VISIT…

А. А. Таскин

ЯВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

ОБОРОНГИЗ 1940

А. А. ТАСКИН

ЯВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

Цена 8 руб. в переплете

НКАП СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МОСКВА—1940

ОТ АВТОРА

Предлагаемая книга представляет собой монографию по одному из важных разделов внутренней балистики.

При изложении материала автор стремился дать в доступной форме современное понимание затронутых вопросов, часть которых не имеет в настоящее время полного решения.

Автором широко использована имеющаяся литература как наша, так и иностранная.

Особое внимание было обращено на практическое приложение полученных зависимостей. В книге дано большое число задач с полным решением.

Большое место уделено обзору наиболее известных теорий износа канала ствола огнестрельного оружия.

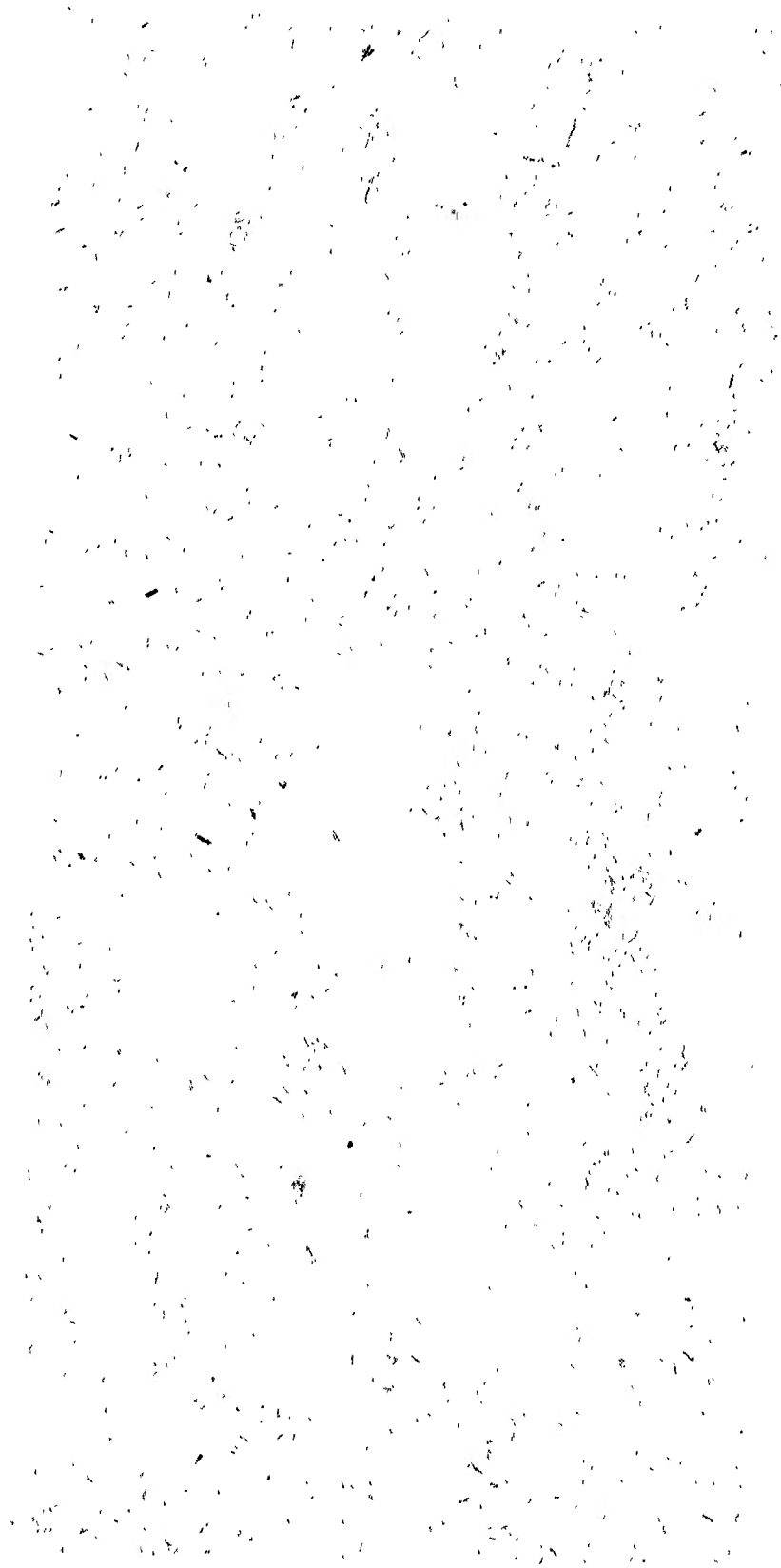
В последней главе дается понятие о периоде последействия пороховых газов, который тесно связан с рассматриваемыми здесь явлениями в канале ствола оружия.

Книга может служить учебным пособием для втузов и академий РККА, а также может быть использована инженерно-техническими работниками заводов и научно-исследовательских институтов оборонной промышленности.

В заключение считаю своим долгом принести благодарность проф. Б. Н. Окуневу, давшему мне целый ряд ценных указаний.

Прошу всех читателей сообщить мне о замеченных недостатках, за что заранее приношу им свою благодарность.

Доц. А. Таскин



ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ВЫСТРЕЛ И СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЕГО ЯВЛЕНИЯ

В существующих образцах огнестрельного оружия снаряд или пуля приобретают скорость под действием пороховых газов, образующихся вследствие взрывчатого разложения порохового заряда.

В огнестрельном оружии имеются три основных элемента: ствол, заряд, снаряд (пуля).

Огнестрельное оружие представляет собой термодинамическую машину, в которой химическая энергия порохового заряда почти мгновенно трансформируется сначала в тепловую, а затем в кинетическую энергию движения всей системы: снаряд, — заряд — ствол. Выделяемая порохом энергия превращается главным образом в кинетическую энергию движения снаряда или пули.

Внутренней балистике, изучающей движение снаряда или пули под действием пороховых газов, а также все явления, связанные с горением пороха и расширением пороховых газов, приходится сталкиваться с целым рядом больших трудностей, обусловленных сложностью процесса выстрела.

Явления, происходящие в канале огнестрельного оружия при выстреле, связаны:

1) с чрезвычайно большими давлениями, развиваемыми пороховыми газами, порядка 1500 — 3000 *am* (в отдельных случаях и выше);

2) с очень высокой температурой пороховых газов, порядка 2000 — 3000° С;

3) с исключительно короткими промежутками времени, порядка 0,01 — 0,001 сек.

Отсюда понятны отмеченные выше трудности, встречаемые при изучении этих явлений. Трудности влекут за собой необходимость применения ряда допущений и упрощений, позволяющих изучить главные факторы, от которых зависят явления.

Явление выстрела представляет собой чрезвычайно сложный процесс, который в условиях обычных образцов огнестрельного оружия протекает следующим образом.

Действием некоторого механического или электрического импульса (искры запальной трубки или же удара бойка по капсюлю и т. д.) вызывается взрывчатое разложение воспламенителя.

3) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . q=22,93 *кг*.
Дульная скорость . . . . . $v_д$=3353 *дм/сек*.
Ускорение силы тяжести . . . g=98,10 *дм/сек*^{2}.

$$A_1=\frac{qv_д^2}{2g}=1314\cdot10^3\ кгдм=131{,}4\ тм.$$

	lg v	3,5254
	2 lg v	7,0508
(+)	lg q	1,3604
	colg 2g	3,7073
	lg A_1	6,1185
	A_1	$1314\cdot10^3$

4) 152-*мм* гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . q =41,0 *кг*.
Дульная скорость . . . . . $v_д$=3810 *дм/сек*.
Ускорение силы тяжести . . . g =98,10 *дм/сек*^{2}.

$$A_1=\frac{qv_д^2}{2g}=3033\cdot10^3\ кгдм=303{,}3\ тм.$$

	lg v	3,5809
	2 lg v	7,1618
(+)	lg q	1,6128
	colg 2g	$\bar{3}$,7073
	lg A_1	6,4819
	A_1	$3033\cdot10^3$

5) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . q=385,9 *кг*.
Дульная скорость . . . . . $v_д$=8940 *дм/сек*.
Ускорение силы тяжести . . g=98,10 *дм/сек*^{2}.

$$A_1=\frac{qv_д^2}{2g}=1571\cdot10^5\ кгдм=1571\cdot10\ тм.$$

	lg v	3,9513
	2 lg v	7,9026
(+)	lg q	2,5865
	colg 2g	$\bar{3}$,7073
	lg A_1	8,1964
	A_1	$1571\cdot10^5$

§ 4. ВЛИЯНИЕ НАРЕЗОВ

Для сообщения снаряду вращательного движения в канале ствола, как известно, имеются нарезы, форма и характер которых рассмотрены ниже.

Наличие нарезов в канале ствола сказывается следующим образом.

1) Врезание ведущих частей снаряда в нарезы для образования выступов на пояске вызывает затрату энергии пороховых газов.

2) При врезании пояска в нарезы в начальный период создаются условия горения заряда, близкие к горению в постоянном объеме, чем изменяется характер горения и вызывается быстрый рост давления на дно снаряда.

3) Угол между осью канала и нарезом при движении снаряда по каналу ствола вызывает давление между боевыми гранями выступа на снаряде и нареза.

4) Давление боевой грани нарезов на боевую грань выступа создает силу трения между ними.

5) При врезании ведущего пояска снаряда в нарезы наряду со срезанием металла пояска происходит обжимание пояска, сдавливание его по окружности. Это давление между пояском и стенками канала является следствием так называемой, „реакции пояска".

6) „Реакция пояска" в свою очередь вызывает трение между наружной поверхностью пояска и стенками канала.

Следует еще отметить влияние нарезов на получение неоднообразных начальных скоростей и максимального давления вследствие прорыва газов, а также влияние на срок службы ствола вследствие наличия в нарезах различных напряжений, вызывающих более быстрый износ стволов.

Таким образом под влиянием вышерассмотренных сил, являющихся следствием наличия нарезов, снаряд приобретает вращательное движение вокруг своей оси и испытывает трение, уменьшающее его скорость в поступательном движении.

Необходимо указать, что наличие нарезов, вызывая ряд дополнительных затрат энергии пороховых газов и влияя на ход процесса горения пороха, все же увеличивает полезное действие заряда.

В опытах Себера и Гюгоньо определялась величина давления и дульной скорости для снарядов одного и того же веса в одном и том же орудии (10-*см* пушка), но с различными ведущими поясками. У одних снарядов ведущий поясок был с готовыми выступами, тогда как у других поясок был обычного типа.

Полученные результаты приведены в табл 1.

Из этой таблицы видно, что p_m изменилось на 1000 *кг/см*^{2}, разница же в работе, произведенной пороховыми газами, получилась в 17,5%.

Таблица 1

	p_m *кг/см*^{2}	$v_д$ *м/сек*
Снаряд с обычным пояском	2399	492,4
Снаряд с готовыми выступами . . .	1399	454,0

С увеличением веса снаряда можно получить при снарядах с готовыми выступами, как показывают опыты, бóльшую дальность, но при одновременном увеличении веса заряда и давления.

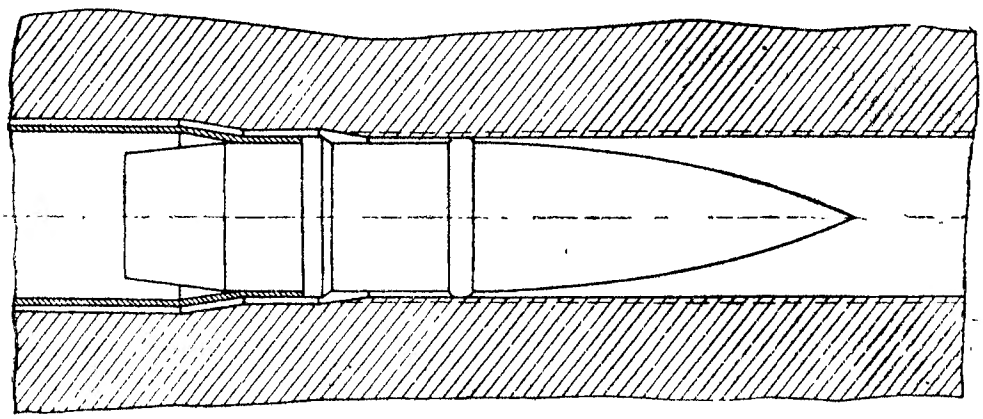
Для 75-*мм* пушки с увеличением веса снаряда на 31% дальность увеличилась на 35% при увеличении давления на 32%.

§ 5. ФОРСИРОВАНИЕ

При заряжании орудия снаряд досылается до упора ведущего пояска в соединительный конус каморы.

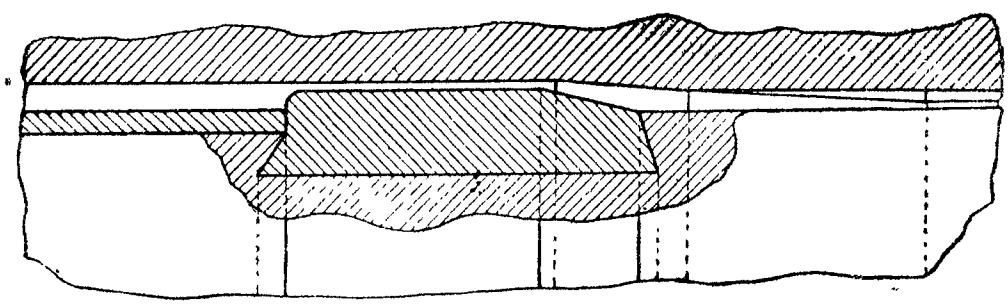
В орудиях, стреляющих унитарным патроном, при заряжании ведущий поясок несколько не доходит до конуса каморы.

Положение снаряда и ведущего пояска в канале ствола до выстрела показано на фиг. 2 и 3.



Фиг. 2.

В некоторый момент, когда давление пороховых газов достигает величины, достаточной для преодоления сопротивлений, оказываемых движению снаряда, ведущий поясок начинает обжиматься и врезаться в нарезы канала ствола.



Фиг. 3.

В стрелковом оружии обжимается и врезается оболочка ведущей части пули.

Явление постепенного врезания ведущего пояска снаряда в нарезы канала ствола орудия или оболочки пули в нарезы канала стрелкового оружия называется форсированием.

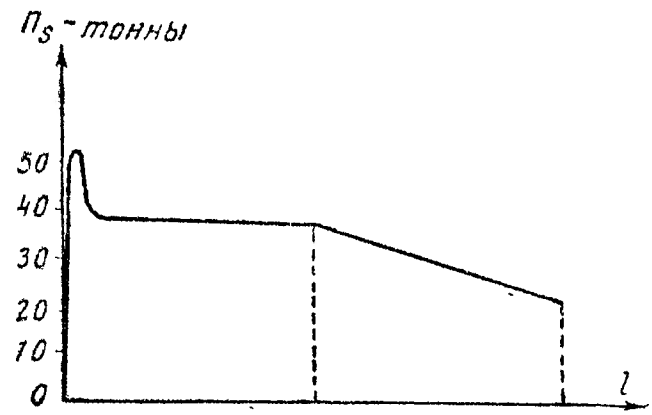
На преодоление сопротивления врезанию пояска затрачивается некоторая часть энергии пороховых газов.

Определение величины работы, на врезание пояска, работы форсирования, а также работы по преодолению сопротивления при движении снаряда по каналу, производилось экспериментально.

Часть опытов заключалась в протяжке снарядов сквозь нарезной канал. Из этих опытов, производившихся у нас, следует указать на опыты А. Матюнина и на опыты инженера М. Розенберга.

Опыты инж. М. Розенберга для 6-дюймовой пушки длиной в 35 и 45 калибров показали, что наибольшее сопротивление на-

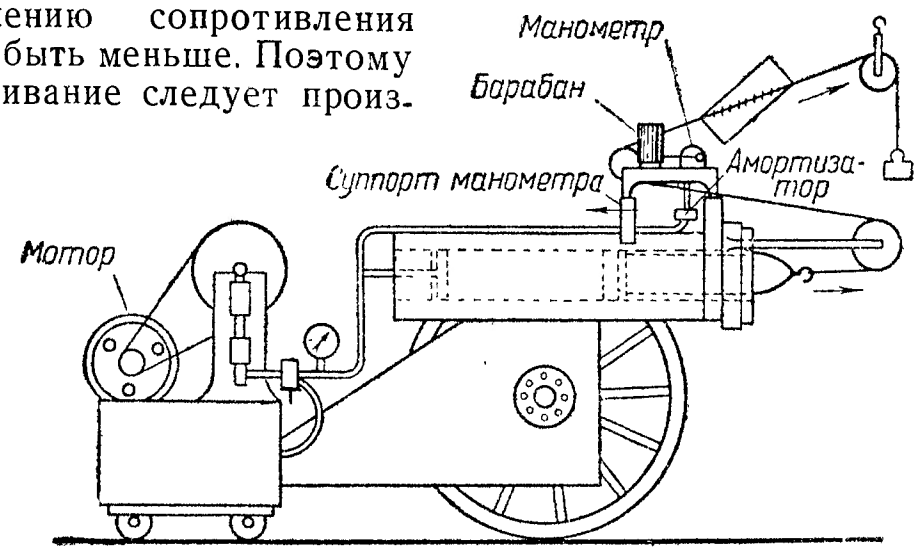
резов движению снаряда соответствует достижению полной глубины нареза. Для преодоления этого наибольшего сопротивления нарезов необходимо давление на дно снаряда 250 *кг/см²*. После максимума сопротивление падает и далее почти не меняется примерно до середины канала, после чего постепенно уменьшается к дульному срезу.



Фиг. 4.

Величина сопротивления у дульного среза составляет около 50% от величины среднего давления (фиг. 4).

Можно полагать, что величина сопротивления, полученная на основании опытов, несколько больше действительной, так как в опытах не учитывалось влияние растяжения стенок ствола при наличии которого работа по преодолению сопротивления должна быть меньше. Поэтому продавливание следует производить не пуансоном, а гидравлическим путем, что приблизило бы условия опыта к действительным (проф. И. П. Граве).



Фиг. 5.

Такие опыты были произведены во Франции Либессаром с применением воды, а затем глицерина. Схема приборов показана на фиг. 5. Изменения давления записывались специальным манометром; характер изменения давления показан на фиг. 6.

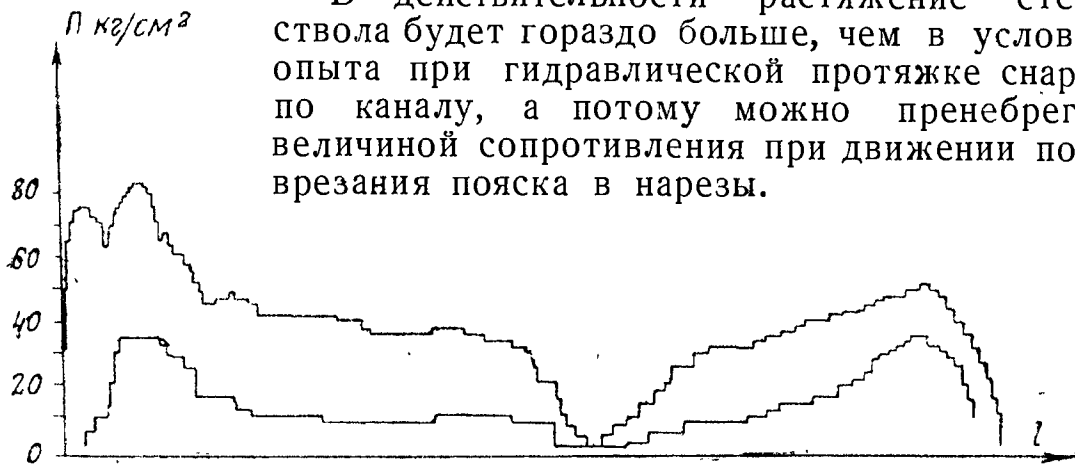
Величины наибольших давлений при врезании оказались выше, чем по опытам инж. Розенберга, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Артиллерийская система	Наибольшее давление в *кг/см²*
37-*мм* пушка.	Около 185
75-*мм* „ .	„ 400
155-*мм* „ .	„ 400—550

Следует отметить, что величина максимального давления уменьшалась при постепенном износе ствола.

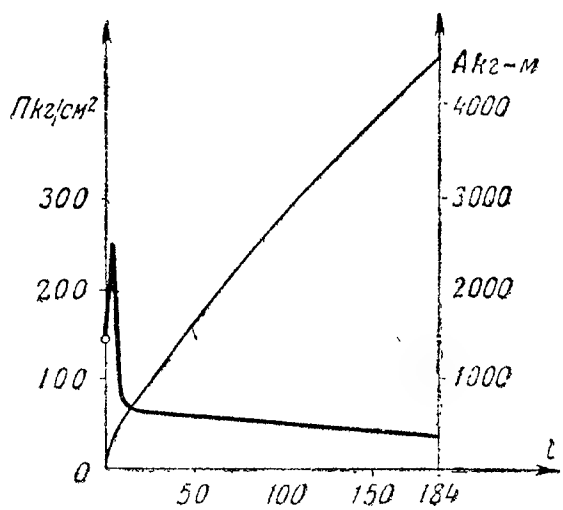
Продавливание одного и того же снаряда также вызывало уменьшение давлений вследствие быстрого износа пояска.



В действительности растяжение стенок ствола будет гораздо больше, чем в условиях опыта при гидравлической протяжке снаряда по каналу, а потому можно пренебрегать величиной сопротивления при движении после врезания пояска в нарезы.

Фиг. 6.

Это подтверждается опытами на Научно-исследовательском артиллерийском полигоне по определению форсирования стрельбой из 76-*мм* пушки образца 1902 г.



Фиг. 7.

Часть снарядов при одной и той же величине заряда вылетала из канала укороченной пушки при незначительном превышении давления (250 *кг/см²*), а другая часть оставалась в канале орудия.

Ход изменения давления, полученный в этих опытах, представлен на фиг. 7.

С момента начала горения заряда до момента достижения давления в 35 — 50 *кг/см²* снаряд остается неподвижным. По достижении указанного давления (равного усилию запрессовывания снаряда в гильзу) снаряд продвинется до упора ведущего пояска в соединительный конус каморы.

Врезание, по опытам, начинается при давлении около 150 *кг/см²* (на передней части пояска появлялись отпечатки нарезов).

Далее, при постепенном врезании пояска на полную глубину нареза давление быстро возрастает до 250 *кг/см²* (на протяжении 30 *мм*), после чего давление резко падает и на длине 40 *мм* становится равным 70 *кг/см²*.

На фиг. 8 и 9 показано появление на пояске следов от нарезов и поясок после врезания на полную глубину нарезов.

Затем давление постепенно изменяется к дульному срезу по прямой до 30 *кг/см*². На фиг. 7 показано также изменение работы по преодолению сопротивления движению снаряда.

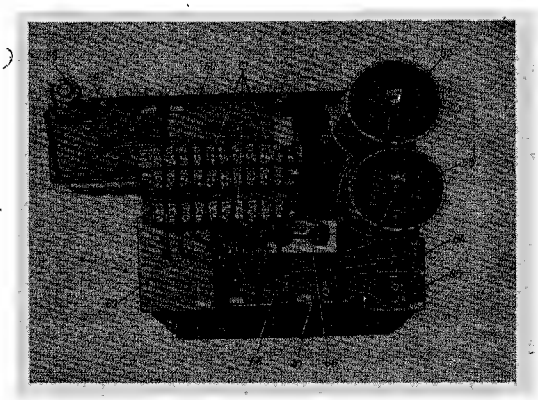
Все экспериментальные исследования показывают, что сопротивление пояска врезанию следует учитывать и что величина этого сопротивления зависит от угла наклона соединительного конуса, от профиля и числа нарезов, а также от размеров и формы ведущего пояска.

Кроме опытного определения работы при врезании можно ее вычислить с помощью формул, полученных теоретическим путем.

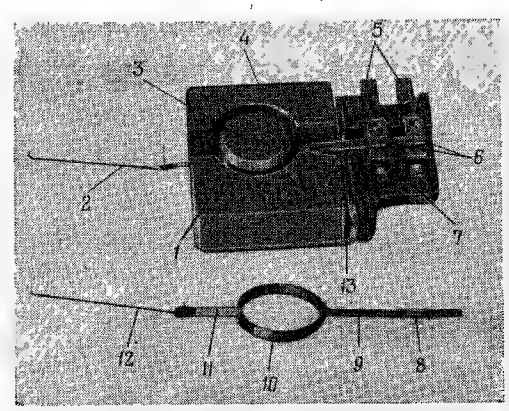
Так, А. Г. Матюнин дает формулу для вычисления работы по обжатию пояска:

$$A_{вр1}=s\left(\frac{K\lambda^2}{2h}+T_0\lambda\right),$$

где s—площадь приложения усилия, K—коэфициент (для меди



Фиг. 8.



Фиг. 9.

он равен 6800—T_0), λ—полуразность диаметра ведущего пояска и диаметра канала по дну нарезов, h—первоначальная толщина пояска, T_0—предел упругости в готовом пояске, который для меди равен 3100 (размерность принята в *кг* и *см*).

Для работы по образованию выступов:

$$A_{вр2}=na\varepsilon\lambda\left[T_0+\frac{4}{3}\sqrt{\frac{K\lambda}{a}\left(\sigma+\frac{1}{2}T_0\varepsilon\right)}\right],$$

где n—число нарезов;

a—ширина поля нареза;

ε—ширина пояска;

σ—сопротивление меди срезанию (при $K=3700$, $\sigma=1760$).

И, наконец, работа по преодолению трения:

$$A_{вр3}=n\varepsilon l\left\{\nu a\left[T_0+\frac{4}{3}\sqrt{\frac{K\lambda}{a}\left(\sigma+\frac{T_0\varepsilon}{2}\right)}\right]+\frac{T_0\varepsilon\lambda}{2}\right\},$$

где l—длина пути, ν—коэфициент трения.

Суммарная работа при врезании будет:

$$\mathbf{A}_{вр}=\mathbf{A}_{вр1}+\mathbf{A}_{вр2}+\mathbf{A}_{вр3}.$$

Величина работы врезания $\mathbf{A}_{вр}$, вычисленная по этим формулам, получалась близкой к опытным данным.

Юстров для вычисления той же работы врезания дает следующую формулу:

$$A_{вр}=\nu\sigma sl_c,$$

где σ —нижний предел нагрузки металла при смятии;

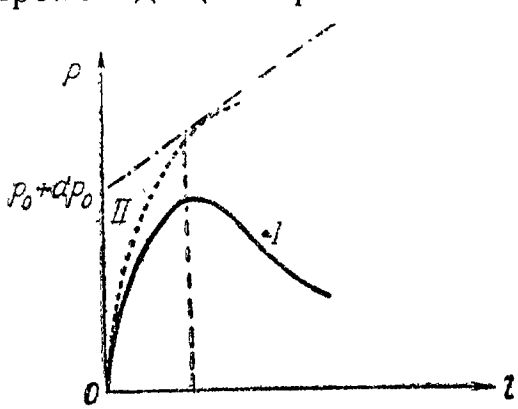
l_c—длина пути снаряда при врезании, равная расстоянию заднего среза пояска до того сечения канала, где нарезка достигает полной глубины.

Работа врезания пояска в решениях основной задачи обычно не рассматривается, за исключением немногих решений за границей (Кранц, Хедкокк, Новаковский) и у нас методом численного интегрирования.

Шарбонье предложил при решении основной задачи внутренней балистики учитывать начальное сопротивление нарезов введением так называемого давления форсирования p_0.

Давлением форсирования будем называть то давление, которое будет иметь место в канале ствола к моменту врезания ведущего пояска снаряда на полную глубину нарезов.

До момента достижения давления p_0 горение считается происходящим при постоянном объеме, а потому величина сгоревшей к этому моменту части заряда ψ_0 определяется по формулам пиростатики.



Фиг. 10.

Величина p_0, полученная на основании опытов по определению усилия для врезания пояска, часть которых рассмотрена выше, а также определенная расчетами и стрельбой при зарядах, достаточных для врезания пояска в нарезы, колеблется в пределах от 200 до 500 *кг/см*^{2}.

Габо определяет p_0 следующим образом. На фиг. 10 графически представлено изменение сопротивления ведущего пояска (*I*). Кривая изменения давления пороховых газов при движении снаряда пойдет несколько выше (*II*). Касательная к кривой *II* в точке, отвечающей максимуму *I* кривой, дает в точке пересечения с осью ординат величину давления, которое Габо обозначает через (p_0+dp_0).

Выражение для p_0 выводится им на основании механических соображений при допущении, что давление (p_0+dp_0) отвечает пределу упругости металла ведущего пояска после обжатия

его до диаметра, равного приведенному калибру (см. стр. 28):

$$p_0+dp_0=4\nu E\frac{\varepsilon}{d'}\cos\beta\left[1+\frac{\sin\beta(\sin\beta+\nu\cos\beta)}{\cos\beta-\nu\sin\beta}\right],$$

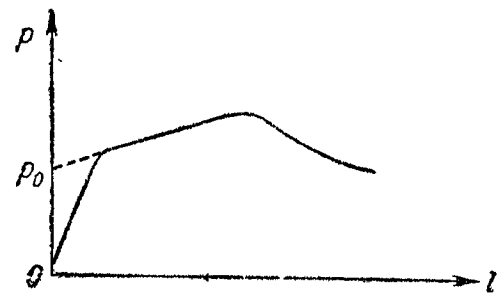
где ν—коэфициент трения;

E—предел упругости металла на сжатие, который определяется графически в зависимости от среднего обжатия ведущего пояска;

ε—ширина ведущего пояска;

β—угол наклона нарезов.

Оттенхеймер предлагает определять p_0 на кривой усилий для врезания пояска (p, l) путем продолжения участка кривой, соответствующего медленному увеличению сопротивления, как указано на фиг. 11.



Фиг. 11.

Шарбонье и Сюго принимают $p_0=200$—$400\ кг/см^2$, причем Сюго считает, что величина $400\ кг/см^2$ выше действительной.

Проф. Кранц дает для орудий средних калибров $p_0=300\ кг/см^2$, тогда как для пуль (со стальной оболочкой) величина p_0 возрастает до $550\ кг/см^2$.

Габо по своим формулам дает для p_0 значения около 300—$400\ кг/см^2$.

По опытам проф. Б. Н. Окунева для оболоченных пуль $p_0=230\ кг/см^2$.

Проф. Н. Ф. Дроздов принимает в своих таблицах $p_0=300\ кг/см^2$.

У Майнарди приведены следующие величины p_0 для различных орудий (табл. 3).

Таблица 3

Артсистема	Калибр d мм	Давление форсирования p_0 кг/см²
Гаубицы и мортиры	76 — 105	200 — 250
	105 — 210	250 — 300
	210 — 400	300 — 350
Пушки	20 — 76	300
	76 — 152 (сред. мощн.)	300 — 350
	152 — 400	
	100 — 152 (больш. мощн.)	400 — 450 (двойн. пояски)

Для оболоченных пуль $p_0=200\ кг/см^2$.

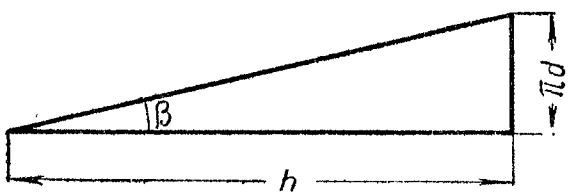
Куттерер для германских пуль приводит следующие величины: p_0=260—330 *кг/см*^{2}, для бронебойных p_0=490 *кг/см*^{2}.

Надо полагать, что величина давления форсирования при подобных поясках не будет зависеть от калибра[1] и будет, очевидно, меняться при изменении формы и размеров пояска, числа и положения нарезов; износ орудия также вызовет изменение p_0.

Обычно в расчетной практике давление форсирования для артиллерийских снарядов с одним пояском принимают равным от 300 до 350 кг/см^2.

§ 6. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ СНАРЯДА В КАНАЛЕ СТВОЛА

Одной из второстепенных работ, производимых пороховыми газами, является работа, затрачиваемая на вращательное движение снаряда, которая может быть выражена живой силой вращательного движения:



Фиг. 12.

$$A_2=\frac{J\omega^2}{2}, \tag{6}$$

где J—момент инерции снаряда относительно его оси симметрии;

ω—угловая скорость вращательного движения около этой же оси, соответствующая любому моменту времени.

Напомним, что момент инерции относительно любой оси есть физическая величина, характеризующая способность тела сопротивляться моментам внешних сил относительно этой оси, стремящимся сообщить телу угловое ускорение или стремящимся изменить угловую скорость вращения около данной оси.

Момент инерции во вращательном движении играет ту же роль, что масса в поступательном движении. Из механики известно, что

$$J=\frac{q}{g}\rho^2, \tag{7}$$

где $\frac{q}{g}$ —масса снаряда, а ρ—радиус инерции.

Развернув один нарез на плоскости (фиг. 12) и обозначив угол между нарезом и производящей канала через β, получим длину хода нарезов h.

Длиной хода нарезов называется то расстояние, на котором нарезы делают один оборот.

Из фиг. 12 имеем:

$$h=\pi d \operatorname{ctg}\beta.$$

[1] Имеющаяся эмпирическая формула проф. Лоренца, дающая зависимость p_0 от калибра, недостаточно проверена.

Заметим: для гаубиц длина хода нарезов изменяется от 15 до 25 калибров, для пушек от 25 до 45 калибров. Винтовки имеют h=30—37 калибров.

Число оборотов снаряда в одну секунду равно

$$\omega=\frac{v}{\pi d \operatorname{ctg}\beta} \text{ об/сек.},$$

или, выражая в радианах, получаем для угловой скорости:

$$\omega=\frac{v2\pi}{\pi d \operatorname{ctg}\beta}=v\frac{2}{d}\operatorname{tg}\beta \text{ рад/сек.} \tag{8}$$

Подставляя найденные значения J и ω (7, 8) в исходную формулу (6) для рассматриваемой работы, получаем

$$\mathbf{A}_2=\frac{q\rho^2}{2g}v^2\left(\frac{2}{d}\right)^2\operatorname{tg}^2\beta=\frac{qv^2}{2g}\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2\operatorname{tg}^2\beta,$$

или, обозначая множитель $\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2$, представляющий собою коэфициент инерции снаряда, через μ, окончательно будем иметь:

$$\mathbf{A}_2=\mathbf{A}_1\mu\operatorname{tg}^2\beta. \tag{9}$$

Таким образом, *работа, затрачиваемая на вращательное движение снаряда, зависит от угла наклона нарезов и от радиуса инерции снаряда.*

В данном случае коэфициент $\varphi_i=\varphi_2=\mu\operatorname{tg}^2\beta$. Для нарезки переменной крутизны величина коэфициента φ_2 будет изменяться с изменением угла наклона нарезов β.

Величина коэфициента инерции μ для артиллерийских снарядов современной формы колеблется в пределах от 0,53 для бронебойных и до 0,60 для тонкостенных фугасных снарядов. Для пуль имеем μ=0,43—0,47.

Угол наклона нарезов β у пушек обычно равен примерно 6—7°, а у гаубиц в дульном срезе около 9—12°.

Величина рассмотренной работы $\mathbf{A}_2$ колеблется в пределах от 0,25 до 2,5% от основной работы поступательного движения снаряда $\mathbf{A}_1$.

Наименьшая величина отвечает пологой нарезке и бронебойному снаряду.

Ниже приводятся вычисления величины работы $\mathbf{A}_2$.

***Задачи 6—9.* Вычисление работы $\mathbf{A}_2$**

6) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Угол наклона нарезов . . . . . $\beta=5°41{,}6'$;
$\operatorname{tg}\beta=0{,}09968$.

Коэфициент инерции . . . . . $\mu=\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2=0{,}450$.

Из предыдущего вычисления . . . . . $\mathbf{A}_1=362\cdot10$ *кгдм*;
$\lg\mathbf{A}_1=3{,}5586$.

	lg tg β	$\bar{2}$,9986
	2 lg tg β	$\bar{3}$,9972
(+)	lg A_1	3,5586
	lg μ	$\bar{1}$,6532
	lg A_2	1,2090
	A_2	16,18

$A_2 = A_1 \mu \operatorname{tg}^2\beta = 16{,}2$ *кгдм* $= 0{,}002$ *тм*.

Полная дульная энергия

$A_1 + A_2 = 362 \cdot 10 + 16{,}2 = 364 \cdot 10$ *кгдм* $=$
$= 0{,}364$ *тм*.

$\frac{A_2}{A_1} = \frac{16{,}2}{362 \cdot 10} = 0{,}0448 \approx 0{,}45\%$.

7) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Угол наклона нарезов . . . . . $\beta = 5°59'$;
$\operatorname{tg}\beta = 0{,}1047$.

Коэфициент инерции . . . . . $\mu = \left(\frac{2\rho}{d}\right)^2 = 0{,}560$.

Из предыдущего вычисления . . . . . $A_1 = 1154 \cdot 10^3$ *кгдм*
$\lg A_1 = 6{,}0625$.

	lg tg β	$\bar{1}$,0200
	2 lg tg β	$\bar{2}$,0400
(+)	lg A_1	6,0625
	lg μ	$\bar{1}$,7482
	lg A_2	3,8507
	A_2	7091

$A_2 = A_1 \mu \operatorname{tg}^2\beta = 709 \cdot 10$ *кгдм* $= 0{,}709$ *тм*.

Полная дульная энергия

$A_1 + A_2 = 1154 \cdot 10^3 + 709 \cdot 10 =$
$= 1161 \cdot 10^3$ *кгдм* $=$
$= 116{,}1$ *тм*.

$\frac{A_2}{A_1} = \frac{709 \cdot 10}{1154 \cdot 10^3} = 0{,}00615 = 0{,}62\%$.

8) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Угол наклона нарезов . . . . . $\beta_д = 8°56'$;
$\operatorname{tg}\beta_д = 0{,}1572$.

Коэфициент инерции . . . . . $\mu = \left(\frac{2\rho}{d}\right)^2 = 0{,}580$.

Из предыдущего вычисления . . . . $A_1 = 1314 \cdot 10^3$ *кгдм*;
$\lg A_1 = 6{,}1185$.

	lg tg β	$\bar{1}$,1965
	2 lg tg β	$\bar{2}$,3930
(+)	lg A_1	6,1185
	lg μ	$\bar{1}$,7634
	lg A_2	4,2749
	A_2	1883·10

$A_2 = A_1 \mu \operatorname{tg}^2\beta = 188 \cdot 10^2$ *кгдм* $= 1{,}88$ *тм*.

Полная дульная энергия

$A_1 + A_2 = 1314 \cdot 10^3 + 188 \cdot 10^2 =$
$= 1333 \cdot 10^3$ *кгдм* $= 133{,}3$ *тм*.

$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1883 \cdot 10}{1314 \cdot 10^3} = 0{,}01433 = 1{,}43\%$.

9) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса

Исходные данные

Угол наклона нарезов . . . . . $\beta=5°59'$;
$\operatorname{tg}\beta=0{,}1048$.

Коэфициент инерции . . . $\mu=\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2=0{,}530$.

Из предыдущего вычисления . . . $A_1=1571\cdot10^5$ *кгдм*;
$\lg A_1=8{,}1964$.

$A_2=A_1\mu\operatorname{tg}^2\beta=917\cdot10^3$ *кгдм* $=91{,}7$ *тм*.

Полная дульная энергия получается равной

$A_1+A_2=1571\cdot10^5+917\cdot10^3=1580\cdot10^5$ *кгдм* $=1580\cdot10$ *тм*.

Величина работы A_2 по отношению к работе A_1

$$\frac{A_2}{A_1}=\frac{9173\cdot10^2}{1571\cdot10^5}=0{,}00584=0{,}58\%.$$

	$\lg\operatorname{tg}\beta$	$\bar{1}{,}0209$
	$2\lg\operatorname{tg}\beta$	$\bar{2}{,}0418$
(+)	$\lg A_1$	$8{,}1964$
	$\lg\mu$	$1{,}7243$
	$\lg A_2$	$5{,}9625$
	A_2	$9173\cdot10^2$

Задача 10. **Вычисление предельных значений A_2**

Наименьшее значение мы получим, принимая длину хода нарезов в 45 калибров и взяв $\mu=0{,}500$.

Подставляя эти значения, получим:

$$\frac{A_2}{A_1}=\mu\operatorname{tg}^2\beta=\mu\left(\frac{\pi}{45}\right)^2=0{,}0024=0{,}24\%.$$

	$\lg\pi$	$0{,}4970$
	$\operatorname{colg} h$	$\bar{2}{,}3468$
	$2\lg\pi$	$0{,}9940$
(+)	$2\operatorname{colg} h$	$\bar{4}{,}6936$
	$\lg\mu$	$\bar{1}{,}6990$
	$\lg\mu\left(\frac{\pi}{h}\right)^2$	$3{,}3866$
	$\mu\left(\frac{\pi}{h}\right)^2$	$0{,}002435$

Наибольшую величину получим, принимая длину хода нарезов в 15 калибров и взяв $\mu=0{,}600$.

Подставляя эти значения, получим:

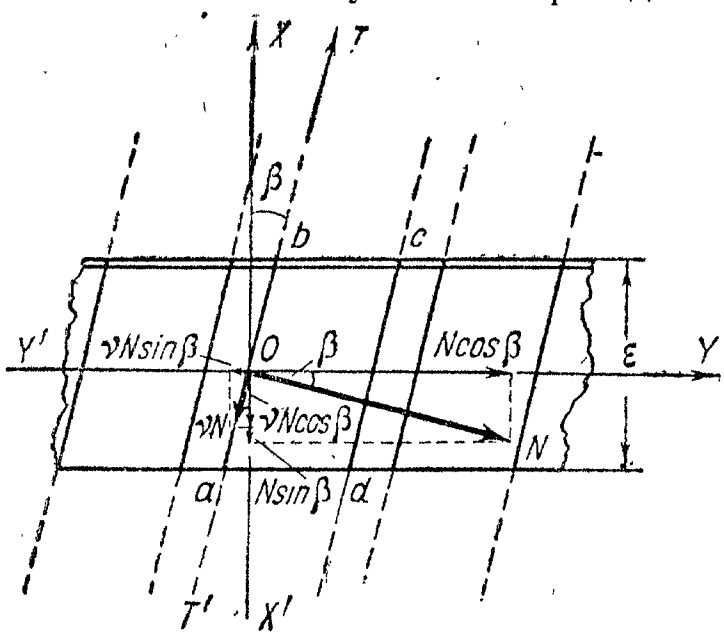
$$\frac{A_2}{A_1}=\mu\operatorname{tg}^2\beta=\mu\left(\frac{\pi}{15}\right)^2=0{,}0263=2{,}63\%.$$

	$\operatorname{colg} h$	$\bar{2}{,}8239$
	$2\lg\pi$	$0{,}9940$
(+)	$2\operatorname{colg} h$	$\bar{3}{,}6478$
	$\lg\mu$	$\bar{1}{,}7782$
	$\lg\mu\left(\frac{\pi}{h}\right)^2$	$\bar{2}{,}4200$
	$\mu\left(\frac{\pi}{h}\right)^2$	$0{,}02630$

§ 7. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВЫСТУПОВ ВЕДУЩЕГО ПОЯСКА И НАРЕЗОВ

При движении снаряда по нарезам канала орудия между поверхностями выступов ведущих частей и нарезов возникают силы, равномерно распределенные и направленные по внешним нормалям к плоскостям соприкосновения выступов.

На боевой грани, вызывающей вращение снаряда, возникающие силы могут быть приведены к одной равнодействующей силе N, направленной по нормали и приложенной в центре поверхности выступа.



Фиг. 13.

Силу N будем называть нормальной реакцией боевой грани.

Рассмотрим отдельный выступ $abcd$ ведущего пояска, изображенного на фиг. 13.

В центре боевой грани ab приложена нормальная реакция боевой грани N.

Разложив ее по направлению производящей канала $X'X$ и по направлению касательной к окружности поперечного сечения $Y'Y$, получим составляющие нормальной реакции $N\sin\beta$ и $N\cos\beta$.

Кроме нормальной реакции боевой грани N, будет действовать сила трения, которая направлена по касательной к нарезу и при обозначении коэфициента трения через ν будет равна νN.

Разложив также по двум направлениям силу νN, будем иметь составляющие этой силы $\nu N\cos\beta$ и $\nu N\sin\beta$.

Равнодействующая составляющих $N\cos\beta$ и $\nu N\sin\beta$, направленных по касательной, представляет собой силу, вызывающую вращение снаряда вокруг своей оси.

Равнодействующая составляющих $N\sin\beta$ и $\nu N\cos\beta$, направленных по производящей канала навстречу движению снаряда, представляет собой сопротивление, оказываемое нарезами поступательному движению снаряда. Как было указано выше, это сопротивление уменьшает скорость поступательного движения и влияет на ход процесса горения пороха.

Сила трения νN при продвижении снаряда по каналу вызывает постепенное истирание боевой грани ведущего выступа, отчего между холостой гранью и нарезом образуется зазор (фиг. 14), величина которого будет зависеть от размеров и материала пояска, а также от длины канала.

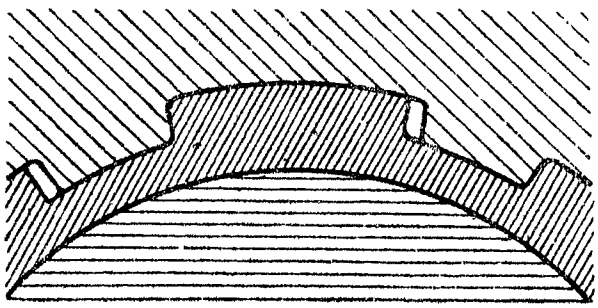
Прогрессивная нарезка вызывает усиление истирания боевой грани, так как по мере изменения угла наклона нареза β по-

верхность соприкосновения выступа и нареза уменьшается (фиг. 15).

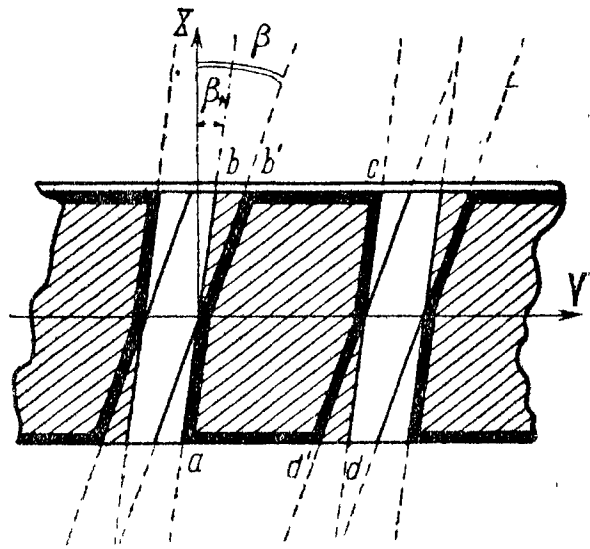
Выступ *abcd*, отвечающий началу нарезной части, изменился, приняв форму *ab'cd'* у дульного среза.

Появление зазоров, вызывая прорыв газов, а следовательно, частично и потерю энергии, способствует износу канала орудия.

Образующееся вследствие „реакции пояска" давление, вели-



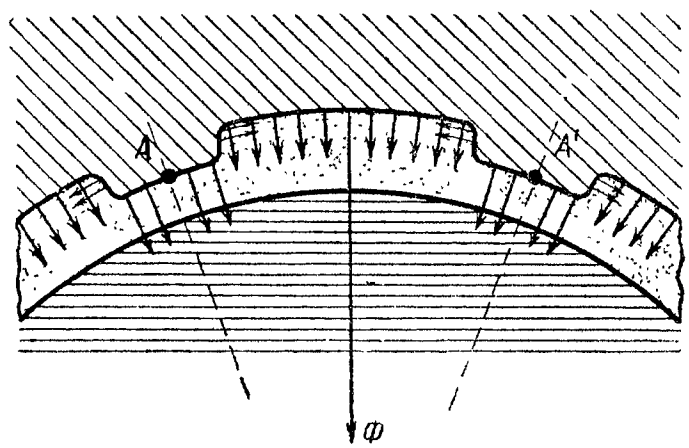
Фиг. 14.



Фиг. 15.

чина которого зависит от материала и размеров соприкасающихся поверхностей, вызовет появление остающихся и упругих деформаций пояска и стенки снаряда.

Давления, направленные по внешним нормалям к плоскостям соприкосновения, можно заменить на протяжении поля и дна нареза AA_1 (фиг. 16), где давления, вообще говоря, будут различны, равнодействующей Ф.



Фиг. 16.

Величину реакции пояска выразим следующим образом:

$$\Phi = \varepsilon (a p_a + b p_b + c p_c + c p_d), \tag{10}$$

где ε — ширина ведущего пояска,

a — ширина поля нареза,

b — ширина дна нареза,

c — глубина нареза,

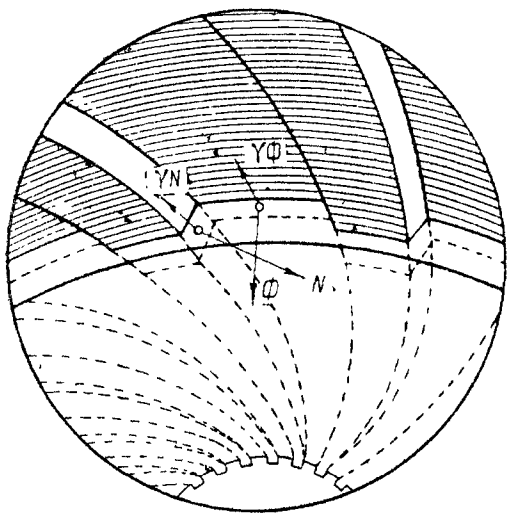
p_a, p_b, p_c и p_d — давление на поле нареза, дне нареза, на боевой и холостой гранях.

И, наконец, реакция пояска Ф вызывает при движении снаряда возникновение силы трения $\nu\Phi$.

Таким образом, кроме силы $p_{сн}S$, связанной с давлением пороховых газов и действующей по оси канала, имеющего n нарезов, к снаряду приложены следующие силы:

$$nN,\quad n\nu N,\quad n\Phi,\quad n\nu\Phi.$$

Прочими действующими силами, например силой трения, которая вызывается силой тяжести, сопротивлением воздуха, обычно пренебрегают.



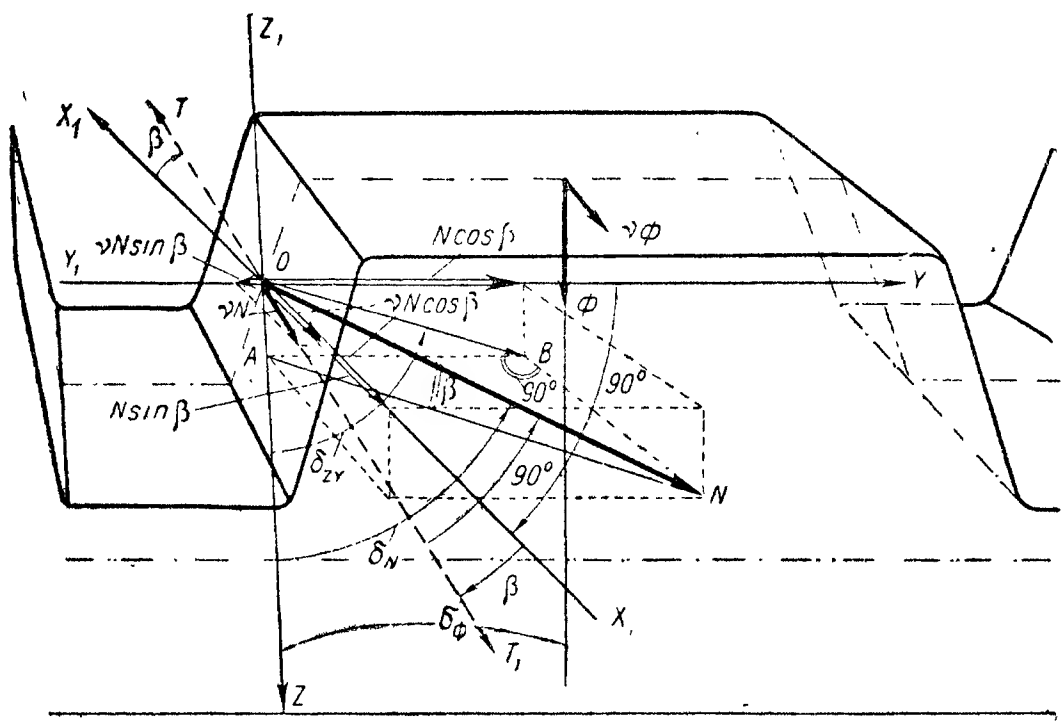
Фиг. 17.

Силы, приложенные к отдельному выступу ведущего пояска снаряда, представлены на фиг. 17 и 18.

Приняв в центре боевой грани O начало координат, направим оси координат следующим образом:

ось X_1X — по производящей канала в сторону движения снаряда,

ось Y_1Y — по касательной к окружности поперечного сечения в сторону вращения снаряда;



Фиг. 18.

ось Z_1Z — по радиусу поперечного сечения ствола, проведенному к центру боевой грани.

Нормальная реакция боевой грани N направлена по нормали к боевой грани выступа, причем на фиг. 18 взят случай, когда

между нормалью к боевой грани и осью Z_1Z имеется некоторый угол δ_N.

На фиг. 18 показано, что нормальная реакция боевой грани N не лежит в плоскости ZOY.

При вычерчивании и изготовлении нарезов обычно пользуются углом δ_{zy} (фиг. 18). Этот угол, как видно из фиг. 18, связан с углом δ_N следующим образом.

Из $\triangle ABN$ имеем:

$$AB = AN\cos\beta.$$

С другой стороны, из $\triangle AOB$,

$$AB = AO\,\mathrm{tg}\,\delta_{zy}.$$

Из $\triangle AON$ следует

$$AN = AO\,\mathrm{tg}\,\delta_N,$$

следовательно,

$$AO\,\mathrm{tg}\,\delta_{zy} = AO\,\mathrm{tg}\,\delta_N\cos\beta;$$

отсюда находим

$$\mathrm{tg}\,\delta_{zy} = \mathrm{tg}\,\delta_N\cos\beta.$$

Сила трения νN направлена по касательной к линии нарезов в сторону, обратную движению снаряда.

Реакция пояска Ф приложена в центре выступа и направлена в центр поперечного сечения.

Между направлением реакции пояска Ф и осью Z_1Z мы будем иметь некоторый угол, который обозначим через δ_Φ.

И, наконец, сила трения $\nu\Phi$ направлена параллельно силе трения νN.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ «РЕАКЦИИ ПОЯСКА» Ф

Реакцию всего пояска $n\Phi$ нельзя найти по формуле (10), так как не известны давления p_a, p_b, p_c и p_d. Она может быть определена только приближенно, на основании опытных данных, полученных при протяжке снаряда сквозь канал орудия, если принять, что усилие при протяжке равно силе трения, возникнувшей от реакции пояска.

Тогда, обозначая площадь поперечного сечения нарезной части канала через s, будем иметь:

$$n\nu\Phi = \Pi s, \tag{11}$$

откуда находим реакцию пояска

$$n\Phi = \frac{\Pi s}{\nu}. \tag{12}$$

Площадь поперечного сечения нарезной части канала с учетом нарезов можно определить следующей приближенной фор-

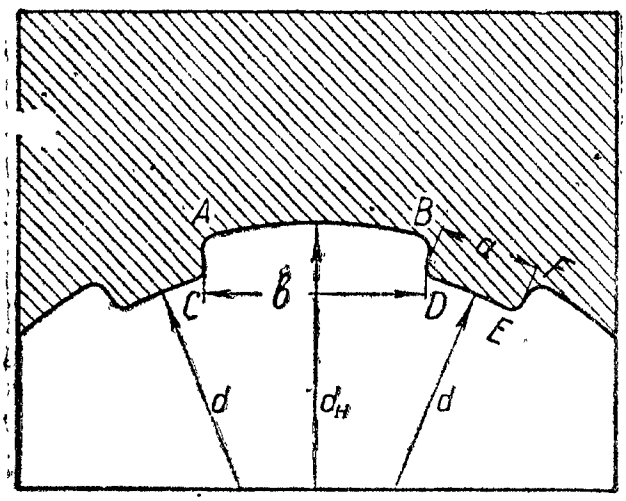
мулой. Если (фиг. 19) a — ширина поля нареза $BDEF$, а b — ширина дна нареза $ABCD$, то

$$s=\frac{\pi}{4}\,\frac{ad^2+bd_н^2}{a+b},$$

где $d_н$ — диаметр канала по дну нарезов.

Обычно ширина дна нареза b в 2 или 3 раза больше ширины поля нареза a.

Для нарезных орудий иногда вместо калибра d — диаметра канала по полям нарезов — рассматривают так называемый приведенный калибр, который определяется из условия равенства площади поперечного сечения нарезной части канала и круга, диаметром которого является приведенный калибр.



Фиг. 19.

Величина приведенного калибра d' определится из условия

$$s=\frac{\pi d'^2}{4},$$

откуда

$$d'=\sqrt{\frac{ad^2+bd_н^2}{a+b}}.$$

В случае малого количества нарезов следует пользоваться точной формулой

$$s=\frac{\pi d^2}{4}+n\ (\text{пл. } ABCD).$$

Для многих вопросов практики для существующих форм нарезов можно пользоваться следующим выражением:

$$s=1{,}02\,\frac{\pi d^2}{4}=0{,}8\,d^2.$$

На фиг. 7 было представлено графическое изображение изменения давления П *кг/см²*, необходимого для врезания пояска и дальнейшего движения снаряда.

По данным инж. М. Розенберга величина Пs для 6-дюймовой пушки в 35 и 45 калибров меняется от 25000—52000 *кг* в начале нарезов и до 7450—31000 *кг* у дула.

Среднее давление на поле и дне нареза можно найти, если, полагая, что при медленной протяжке снаряда сквозь канал давления на боковых гранях выступов p_c и p_d будут малы, пренебрежем величинами cp_c и cp_d.

Тогда из формулы (10) получим:

$$n\,\nu\Phi=n\nu_\varepsilon\,(ap_a+bp_b),$$

откуда найдем среднее давление на поле и дне нареза $p_{ab\,ср}$:

$$n\nu\Phi = n\nu\varepsilon\, p_{ab\,ср}(a+b)$$

или

$$p_{ab\,ср} = \frac{n\nu\Phi}{n\nu\varepsilon\,(a+b)}.$$

Подставляя сюда значение $n\nu\Phi$ из уравнения (11), найдем

$$p_{ab\,ср} = \frac{\Pi s}{n\,\nu\varepsilon\,(a+b)}.$$

Среднее давление $p_{ab\,ср}$ получается по данным инж. М. Розенберга весьма значительным: от 2600—5000 *am* до 700—2880 *am*.

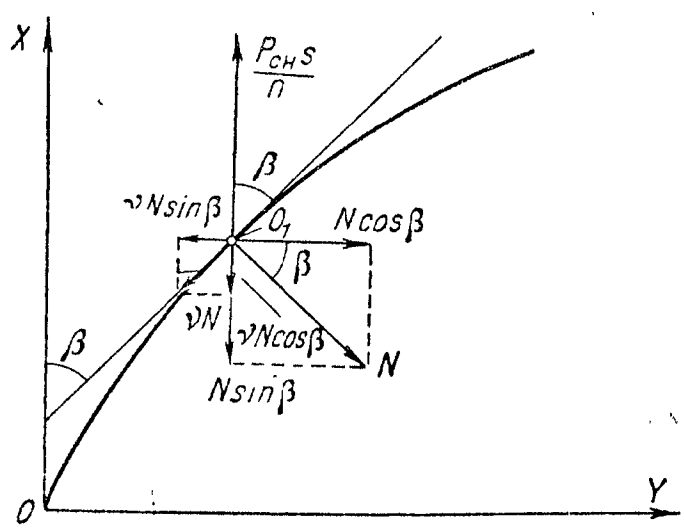
Что касается коэфициента трения ν, то его обычно принимают равным 0,176 по данным Кранца.

У других авторов величину этого коэфициента находим близкой к принятому значению, например: у Бринка 0,2, Нобля 0,203, Шарбонье 0,167 и т. д.

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ БОЕВОЙ ГРАНИ НАРЕЗА *N*

Выражение для определения нормальной реакции боевой грани N можно получить следующим образом.

Развернем поверхность канала на плоскости (фиг. 20) и рассмотрим силы $\frac{p_{сн}S}{n}$, N и νN, приложенные в центре боевой грани выступа пояска в точке O, развернутого нареза, взятого для общего случая переменной крутизны, и наиболее распространенной формы, с гранями, параллельными радиусу, проведенному в середину нареза.



Фиг. 20.

При определении величины N силой Φ обычно приходится пренебрегать вследствие отсутствия достаточных данных. В указанном примере с 6-дюймовой пушкой учет силы Φ увеличит величину N примерно на 20%.

Начало координат O принимаем в начале нареза в центре боевой грани. Ось OX направляем по производящей канала в сторону движения снаряда, ось OY — по касательной к окружности поперечного сечения в сторону вращения снаряда.

Возьмем проекции на ось OX учитываемых сил, действующих навстречу движению снаряда,

$$(-N\sin\beta - \nu N\cos\beta).$$

Тогда уравнение поступательного движения снаряда будет иметь вид:

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{\text{сн}}s - n(N\sin\beta + \nu N\cos\beta)$$

или

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{\text{сн}}s - nN(\sin\beta + \nu\cos\beta). \tag{13}$$

Для определения неизвестных в этом уравнении N и $\frac{dv}{dt}$ составим уравнение вращательного движения снаряда. Проекции тех же сил на ось OY представятся в виде:

$$(N\cos\beta - \nu N\sin\beta),$$

и уравнение вращательного движения получает следующий вид

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2}n(N\cos\beta - \nu N\sin\beta)$$

или

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2}nN(\cos\beta - \nu\sin\beta), \tag{14}$$

где J—момент инерции, ω— угловая скорость вращения снаряда и $\frac{d}{2}$ — плечо действия силы, вызывающей вращение.

Вводя прежние обозначения для коэфициента инерции снаряда:

$$\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2 = \mu,$$

получим:

$$\rho = \frac{d}{2}\sqrt{\mu},$$

а следовательно, для момента инерции найдем:

$$J = \frac{q}{g}\rho^2 = \frac{q}{g}\left(\frac{d}{2}\right)^2\mu. \tag{15}$$

Для угловой скорости вращения снаряда по предыдущему имели:

$$\omega = \frac{2}{d}v\operatorname{tg}\beta,$$

откуда, диференцируя, найдем:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{d}\frac{d(v\operatorname{tg}\beta)}{dt}. \tag{16}$$

Подставляя в левую часть уравнения (14) для $J\frac{d\omega}{dt}$ полученные выражения для J и $\frac{d\omega}{dt}$ (15, 16), получим:

$$\frac{q}{g}\left(\frac{d}{2}\right)^2 \mu \frac{2}{d}\frac{d(v\operatorname{tg}\beta)}{dt}=\frac{d}{2}nN(\cos\beta-\nu\sin\beta),$$

или, произведя соответствующие сокращения, будем иметь:

$$\frac{q}{g}\mu\frac{d(v\operatorname{tg}\beta)}{dt}=nN(\cos\beta-\nu\sin\beta).$$

После диференцирования получим:

$$\mu\left(\operatorname{tg}\beta\frac{q}{g}\frac{dv}{dt}+\frac{q}{g}v\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dt}\right)=nN(\cos\beta-\nu\sin\beta).$$

Подставляя сюда значение $\frac{q}{g}\frac{dv}{dt}=p_{\text{сн}}s-nN(\sin\beta+\nu\cos\beta)$, из уравнения (13) находим:

$$\mu\left\{\operatorname{tg}\beta\left[p_{\text{сн}}s-nN(\sin\beta+\nu\cos\beta)\right]+\frac{q}{g}v\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dt}\right\}=nN(\cos\beta-\nu\sin\beta).$$

Решая это уравнение относительно N, будем иметь:

$$\mu\left[p_{\text{сн}}s\operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g}v\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dt}\right]=nN\left[(\mu\sin\beta\operatorname{tg}\beta+\cos\beta)-\nu(1-\mu)\sin\beta\right]$$

и

$$N=\frac{\mu}{n}\cdot\frac{p_{\text{сн}}\operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g}v\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dt}}{(\mu\sin\beta\operatorname{tg}\beta+\cos\beta)-\nu(1-\mu)\sin\beta}.$$

Пользуясь только одной тригонометрической величиной $\operatorname{tg}\beta$ и учитывая, что $dt=\frac{dv}{dx}$, где x есть расстояние снаряда от начала координат, равное сумме абсциссы начала нарезов a и пути снаряда l, после преобразований окончательно получаем:

$$N=\frac{\mu}{n}\cdot\frac{\left(p_{\text{сн}}s\operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g}v^2\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dx}\right)\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}}{1+\mu\operatorname{tg}^2\beta-\nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}. \tag{17}$$

Для нареза, нормаль к боевой грани которого составляет некоторый угол δ_Φ с радиусом, проведенным в центр боевой грани, а также при учете реакции пояска Ф, нормальная реакция боевой грани N выражается несколько иной формулой, даваемой А. Ф. Бринком.

Формула легко выводится тем же методом.

Для удобства составления необходимых уравнений найдем проекции всех сил, действующих на отдельный выступ ведущего пояска на оси X, Y и Z, которые сведем в следующую таблицу (см. фиг. 18).

Сила \ Ось	X	Y	Z
N	$-N \sin \delta_N \sin \beta$	$N \sin \delta_N \cos \beta$	$N \cos \delta_N$
νN	$-\nu N \cos \beta$	$-\nu N \sin \beta$	0
Φ	0	$-\Phi \sin \delta_\Phi$	$-\Phi \cos \delta_\Phi$
$\nu\Phi$	$-\nu\Phi \cos \beta$	$-\nu\Phi \sin \beta$	0

Беря проекции всех учитываемых сил на ось X, составим уравнение поступательного движения снаряда, которое в этом случае представится в следующем виде:

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{\text{сн}} s - n\,(N \sin \delta_N \sin \beta + \nu N \cos \beta + \nu \Phi \cos \beta). \tag{18}$$

По аналогии с предыдущим составим уравнение вращательного движения, принимая во внимание вышеприведенные проекции сил на ось Y.

Кроме того, следует иметь в виду, что сила Φ направлена по радиусу. Разницей же в величине плеча, на котором действует сила $\nu\Phi$, по сравнению с плечом $\frac{d}{2}$ можно пренебречь.

Тогда будем иметь:

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2}\, n\,(N \sin \delta_N \cos \beta - \nu N \sin \beta - \nu \Phi \sin \beta). \tag{19}$$

На основании предыдущего имеем:

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{q}{g}\,\mu\,\frac{d}{2}\,\frac{d(v \operatorname{tg} \beta)}{dt}$$

или после дифференцирования

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2}\,\mu\left[\frac{q}{g}\operatorname{tg}\beta\frac{dv}{dt} + \frac{q}{g}v\frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right].$$

После подстановки последнего уравнения в уравнение (19) найдем

$$\mu\left(\frac{q}{g}\operatorname{tg}\beta\frac{dv}{dt} + \frac{q}{g}v\frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right) = n\,(N \sin \delta_N \cos \beta - \nu N \sin \beta - \nu \Phi \sin \beta).$$

Учитывая значение $\frac{q}{g}\frac{dv}{dt}$, из уравнения (15) получим:

$$\mu\left\{\operatorname{tg}\beta\left[p_{\text{сн}} s - n\,(N \sin \delta_N \sin \beta + \nu N \cos \beta + \nu \Phi \cos \beta)\right] + \frac{q}{g}v\frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right\} = nN\,(\sin \delta_N \cos \beta - \nu \sin \beta) - \nu \Phi \sin \beta$$

или

$$\mu\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g} v \frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right)-\mu nN \operatorname{tg}\beta\left(\sin\delta_N \sin\beta-\nu\cos\beta\right)+$$

$$+\mu n \operatorname{tg}\beta \nu\Phi\cos\beta=nN\left(\sin\delta_N\cos\beta-\nu\sin\beta\right)-\nu\Phi\sin\beta;$$

отсюда после преобразований найдем:

$$\mu\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g} \frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right)=$$

$$=nN\left[\sin\delta_N\left(\cos\beta+\mu\sin\beta\operatorname{tg}\beta\right)-\nu(1-\mu)\sin\beta\right]-n\nu(1-\mu)\Phi\sin\beta.$$

Решая это уравнение относительно N, получаем:

$$N=\frac{\mu}{n}\cdot\frac{\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g} v \frac{d \operatorname{tg}\beta}{dt}\right)+n\nu(1-\mu)\Phi\sin\beta}{\sin\delta_N\left(\cos\beta+\mu\sin\beta\operatorname{tg}\beta\right)+\nu(1-\mu)\sin\beta}.$$

Пользуясь, как и в предыдущем случае, только одной тригонометрической величиной, после преобразований получим:

$$(20)\qquad N=\frac{\mu}{n}\cdot\frac{\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g} v^2 \frac{d \operatorname{tg}\beta}{dx}\right)\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}+n\nu(1-\mu)\Phi\operatorname{tg}\beta}{\sin\delta_N\left(1+\mu\operatorname{tg}^2\beta\right)+\nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}.$$

Выражение для N в некоторых случаях можно упростить.

Принимая во внимание, что знаменатель формул 17 и 20 для N близок к единице, без учета силы Φ, имеем следующее приближенное выражение:

$$N=\frac{\mu}{n}\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta+\frac{q}{g} v^2 \frac{d \operatorname{tg}\beta}{dx}\right)\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}.$$

В случае же нарезки постоянной крутизны $\frac{d \operatorname{tg}\beta}{dx}=0$, и формула 17 для N принимает вид:

$$N=\frac{\mu}{n}\cdot\frac{p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}}{1+\mu\operatorname{tg}^2\beta-\nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}.$$

Приближенное выражение для этого случая будет:

$$N=\frac{\mu}{n} p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}.$$

Для снарядов с готовыми выступами применимы те формулы, в которых мы пренебрегли реакцией пояска Φ.

Проф. Кранц, а также проф. Д. А. Вентцель дают другое выражение для нормальной реакции боевой грани.

Исходными выражениями являются также уравнения поступательного и вращательного движения, которые для случая

нарезов, имеющих угол $\delta_N=90°$, и без учета реакции пояска Ф напишутся так:

$$\frac{q}{g}\frac{dv_a}{dt}=p_{\text{сн}}s-nN(\sin\beta+\nu\cos\beta), \tag{21}$$

где v_a—абсолютная скорость движения снаряда по отношению к земле, а не к орудию, и

$$J\frac{d\omega}{dt}=\frac{d}{2}nN(\cos\beta-\nu\sin\beta).$$

Последнее уравнение преобразовывается с помощью выражений для ω и J, а именно:

$$\omega=\frac{2\chi}{d}\operatorname{tg}\beta v_a,$$

где при обозначении скорости отката орудия через V_0

$$\chi=1+\frac{V_0}{v_a};$$

$$J=\mu\frac{q}{g}\left(\frac{d}{2}\right)^2.$$

Тогда

$$\mu\frac{q}{g}\chi\operatorname{tg}\beta\frac{dv_a}{dt}=nN(\cos\beta-\nu\sin\beta).$$

На основании полученного уравнения и последнего уравнения для $\frac{q}{g}\frac{dv_a}{dt}$ будем иметь:

$$\frac{q}{g}(1+\nabla)\frac{dv_a}{dt}=p_{\text{сн}}s,$$

где через ∇ обозначено следующее выражение:

$$\nabla=\mu\chi\operatorname{tg}\beta\frac{\operatorname{tg}\beta-\nu}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}.$$

Разделив уравнение 21 для $\frac{q}{g}\frac{dv_a}{dt}$ на последнее уравнение, получим:

$$\frac{1}{1+\nabla}=1-\frac{nN}{p_{\text{сн}}s}(\sin\beta+\nu\cos\beta),$$

откуда, решая это уравнение относительно N, находим

$$N=\frac{p_{\text{сн}}s}{n}\frac{\nabla}{1+\nabla}(\sin\beta+\nu\cos\beta).$$

Выражая последнее уравнение через одну тригонометрическую величину и подставляя значение ∇, окончательно получаем:

$$N=\frac{\mu}{n}\frac{p_{\text{сн}}s\chi\operatorname{tg}\beta\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}}{1+\mu\chi\operatorname{tg}^2\beta-\nu(1-\mu\chi)\operatorname{tg}\beta}.$$

У проф. Швиннинга приводится формула для определения нормальной реакции боевой грани N, мало отличающаяся от

приведенных здесь:

$$N=\frac{\mu}{n}\,\frac{\left[ps\,\mathrm{tg}\,\beta+(1+\xi)\,\frac{q}{g}\,v^2\,\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}\right]\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\,\beta}}{(1+\xi)\,(1-\nu\,\mathrm{tg}\,\beta)},$$

где ξ — коэфициент, введенный для учета потерь энергии пороховых газов в стволе вследствие влияния нарезов, ускорения заряда и т. д., величина которого равна примерно 0,11.

Обе последних формулы для N даны в принятых здесь обозначениях и приведены к этому виду для удобства сравнения с формулами 17 и 20.

Габо дает следующую формулу для N:

$$N=\frac{1}{n}\,\frac{\mu sp\,\mathrm{tg}\,\beta-\mu\nu_v\Pi\pi d'\varepsilon\,\sin\beta+\nu_v\,\Pi\pi d'\varepsilon\,\sin\beta\cos\beta}{\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\sin\beta+\nu_v\cos\beta)+\cos\beta-\nu_v\,\sin\beta}$$

или приближенную формулу:

$$N=\frac{1}{n}\,\frac{\mu\,sp\,\sin\beta-\frac{1}{2}\,\nu_v\,\Pi\pi d'\varepsilon\,\sin\beta\cos\beta}{0{,}99},$$

где ν_v — коэфициент трения для скорости $\frac{v}{\cos\beta}$,

Π — давление врезания пояска в канал ствола орудия.

Отметим еще формулу для N, даваемую Юстровым для участка канала от начала нарезов до места наибольшего давления пороховых газов:

$$N=\frac{\mu}{n}\,\frac{\frac{3}{4}\,d^2\,p_m\,\mathrm{tg}\,\beta+\sigma\,\sin\beta\,(\sin\alpha+\nu\cos\alpha)\,f}{bc},$$

где σ — 2500 $кг/см^2$ — предел текучести меди на смятие,

α — угол наклона соединительного конуса;

f — часть боковой поверхности пояска, подвергающаяся давлению со стороны полей при врезании;

p_m — максимальное давление пороховых газов на дно снаряда;

n — число нарезов;

b — рабочая ширина ведущего пояска;

c — глубина нареза, изменяющаяся в начале нарезной части от нуля.

И, наконец, интересно привести приближенную формулу Кайзера

$$N=\frac{\mu}{n}\,\frac{ps\,\mathrm{tg}\,\beta}{bc}.$$

Все рассмотренные формулы дают для N примерно близкие результаты и мало отличаются со стороны удобства применения.

Полученные выражения для нормальной реакции боевой грани на один выступ N дают возможность рассчитывать прочность нарезки и выступов пояска соответственно развивающимся давлениям при движении снаряда по каналу и вычислять работу по преодолению сопротивления, оказываемого нарезами.

Величина нормальной реакции N достаточно велика и может превзойти допустимую нагрузку на смятие.

Формулу для определения средней величины нормальной реакции на боевую грань $N_{ср}$ можно получить следующим образом.

Обозначив среднюю величину силы, вызывающей вращение снаряда через $F_{ср}$, из фиг. 24 будем иметь:

$$F_{ср} = N_{ср} \cos \beta,$$

откуда

$$N_{ср} = \frac{F_{ср}}{\cos \beta}.$$

С другой стороны, $F_{ср}$ можно определить из формулы для $\mathbf{A}_2$, представив $\mathbf{A}_2$ как произведение момента силы $F_{ср}$ на угол поворота; тогда

$$\mathbf{A}_2 = F_{ср} \frac{d}{2} \frac{l_д 2\pi}{\pi d \operatorname{ctg} \beta} = F_{ср} \frac{l_д}{\operatorname{ctg} \beta},$$

откуда

$$F_{ср} = \frac{\mathbf{A}_2 \operatorname{ctg} \beta}{l_д}.$$

Подставляя полученное выражение в формулу для $N_{ср}$, получим:

$$N_{ср} = \frac{\mathbf{A}_2 \operatorname{ctg} \beta}{l_д \cos \beta} = \frac{\mathbf{A}_1 \mu \operatorname{tg} \beta}{l_д \cos \beta}.$$

Рассматривая среднюю нормальную реакцию боевой грани для одного выступа пояска и пользуясь только одной тригонометрической величиной, найдем:

$$N_{ср} = \frac{\mu}{n} \frac{qv^2}{2g} \frac{\operatorname{tg} \beta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{l_д}.$$

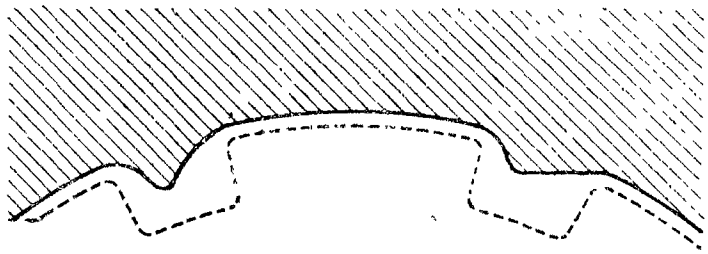
Принимая во внимание незначительную величину $\operatorname{tg}^2 \beta$ по сравнению с единицей, можем пренебречь величиной $\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}$. Окончательно будем иметь:

$$N_{ср} = \frac{\mu}{n} \frac{qv^2}{2g} \frac{\operatorname{tg} \beta}{l_д}.$$

Предлагаемая автором формула обладает достаточной простотой и является удобной для вычисления (см. задачу 11).

Имеются указания (проф. И. П. Граве), что при расчетах нормальной реакции боевой грани, за отсутствием данных относительно реакции пояска Ф, надо увеличивать ее на 20%, иначе говоря, вводить множитель 1, 2.

Под действием нормальной реакции боевой грани N происходит износ боевой грани нарезов и особенно изнашивается



Фиг. 21.

боевая грань выступа ведущего пояска, которая может быть в некоторых случаях совершенно срезана. Обычное изменение нарезов представлено на фиг. 21.

Задача 11. **Определение средней величины нормальной реакции боевой грани N**

Снаряд 76,2-*мм* пушки образца 1902 г.

Исходные данные:

Длина нарезной части . . . . $l_д = 18{,}44$ *дм*.
Число нарезов . . . . . $n = 24$.

Остальные данные из предыдущих вычислений:

$$N_{ср} = \frac{\mu}{n}\,\frac{qv^2}{2g}\,\frac{\operatorname{tg}\beta\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}}{l_д} = 154\ кг.$$

	$\lg \frac{q}{g}$	2,8246
	$2\lg v$	7,5390
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,7482
(+)	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{1}$,0200
	$\lg \sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}$	0,0024
	$\operatorname{colg} 2$	$\bar{1}$,6990
	$\operatorname{colg} l_д$	$\bar{2}$,7343
	$\operatorname{colg} n$	$\bar{2}$,6198
	$\lg N_{ср}$	2,1873
	$N_{ср}$	153,9
	$\lg N_{ср}$	2,1849
	$N_{ср}$	153,1

Принимая площадь соприкосновения боевой грани и выступа ведущего пояска $10{,}0\ мм \times 0{,}76\ мм = 7{,}6\ мм^2$, получим давление на боевую грань около 2000 *кг/см*^{2}.

Пренебрегая величиной $\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}$ и вычисляя $N_{ср}$ по предлагаемой формуле

$$N_{ср} = \frac{\mu}{n}\,\frac{qv^2}{2g}\,\frac{\operatorname{tg}\beta}{l_д},$$

находим незначительное изменение величины $N_{ср}$

$$N_{ср} = 153\ кг.$$

§ 10. АНАЛИЗ ФОРМУЛ ДЛЯ НОРМАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ БОЕВОЙ ГРАНИ НАРЕЗА N

Анализируя выражения для нормальной реакции боевой грани N (17 и 20), величина которой определяет прочность нарезов и выступов пояска, можем заключить:

1. *Величина нормальной реакции N зависит от устройства снаряда и распределения массы*, на что указывает входящий в формулу коэфициент инерции μ, пропорциональный моменту инерции снаряда около оси.

2. *Нормальная реакция N обратно пропорциональна числу нарезов n.* Отсюда следует, что для обеспечения правильного ведения снаряда по каналу орудия и для сохранности выступов на пояске число нарезов следует увеличивать. Заметим, что число нарезов n обычно близко к величине утроенного калибра, взятого в сантиметрах и берется кратным 4 или 8, по соображениям технологического порядка [1].

3. *Нормальная реакция N зависит от давления на дно снаряда* $p_{сн}$, входящего множителем в первое слагаемое числителя, которое можно рассматривать как часть давления, приходящегося на нарез и выступ.

Заметим, что при переменной крутизне нареза в момент достижения максимального давления p_m это первое слагаемое будет меньше, чем при постоянной крутизне нарезки, так как угол наклона нарезов β будет меньше для того же значения $\beta_д$.

Величина N зависит главным образом от величины первого слагаемого и в случае нарезки постоянной крутизны прямо пропорциональна давлению (§ 9).

4. *Второе слагаемое числителя* в общем выражении для N (17, 20) содержит производную $\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}$; оно, следовательно, зависит от уравнения нарезки, которое можно представить в общем виде:

$$y=F(x),$$

где x по прежнему равно сумме $a+l$ (§ 9).

Для примера получим производную для нарезки прогрессивной крутизны. Пусть прогрессивная нарезка представляет собою параболу второго порядка. Тогда

$$y=px^2,$$

$$\mathrm{tg}\,\beta=\frac{dy}{dx}=2px,$$

$$\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}=\frac{d^2y}{dx^2}=2p.$$

Если имеется круговая нарезка, причем начало координат помещено на окружности в точке касания с производящей канала, то будем иметь:

$$y=r-\sqrt{r^2-x^2},$$

где r — радиус круга, по которому проведены нарезы. Тогда

$$\mathrm{tg}\,\beta=\frac{dy}{dx}=\frac{x}{\sqrt{r^2-x^2}}$$

---

[1] Если известна ширина поля a и ширина нареза b, то число нарезов можно определить из уравнения:

$$n=\frac{\pi d}{a+b}$$

и

$$\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}=\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{r^2}{\sqrt{(r^2-x^2)^3}}.$$

В случае нарезки постоянной крутизны $\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}=0$; следовательно, второе слагаемое числителя выражения нормальной реакции N будет влиять на величину N лишь в случае прогрессивной крутизны нарезки, когда $\frac{d\,\mathrm{tg}\,\beta}{dx}\neq 0$. Таким образом это слагаемое представляет собою то сопротивление движению, которое появляется вследствие прогрессивной крутизны нарезки. Оно зависит от живой силы снаряда и наибольшее значение принимает у дульного среза, где значение его будет больше первого слагаемого.

5. В формуле для N (20) с учетом силы Ф имеется еще третье слагаемое в числителе, зависящее от реакции пояска и коэфициента трения ν. Относительное влияние его невелико. По имеющимся опытным данным величина этого слагаемого не более 10—20% величины первого слагаемого.

6. Величина знаменателя для случая нарезки, у которой $\delta_N\neq 90°$,

$$\sin\delta_N(1+\mu\,\mathrm{tg}^2\,\beta)-\nu(1-\mu)\,\mathrm{tg}\,\beta,$$

будет увеличиваться с увеличением δ_N. Следовательно, наименьшее значение N будет при $\delta_N=90°$, принятом в большинстве нарезок наших орудий.

Уменьшение угла δ_N вызывает увеличение N, могущее принять чрезвычайно большое значение при малом значении этого угла.

7. С увеличением коэфициента трения ν нормальная реакция N возрастает.

8. Угол наклона нарезов β входит как в числитель, так и в знаменатель исследуемых формул 17 и 20.

С увеличением β числитель возрастает. Что касается знаменателя, то изменение его крайне незначительно при изменении β, а, принимая во внимание значительно более быстрый рост с изменением угла β числителя по сравнению с ростом знаменателя, можно заключить, что с увеличением угла наклона нарезов β нормальная реакция N возрастает.

Можно подсчитать величину угла β, при котором вращение станет невозможным. Для этого мы должны взять выражение проекций сил на ось OY

$$N(\cos\beta-\nu\sin\beta)$$

и приравнять его нулю. Тогда

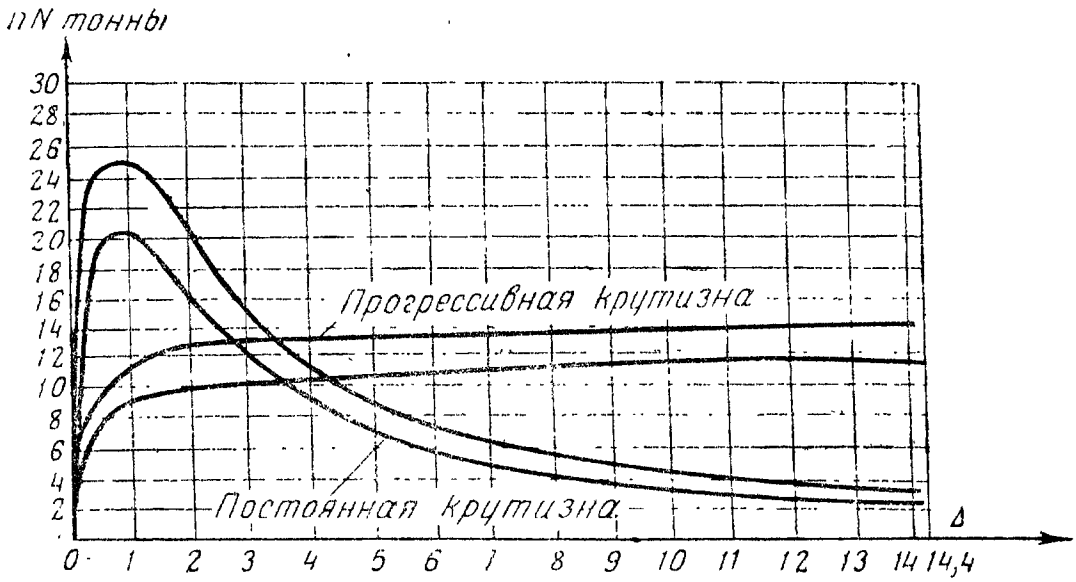
$$\cos\beta=\nu\sin\beta$$

и

$$\nu=\mathrm{ctg}\,\beta,$$

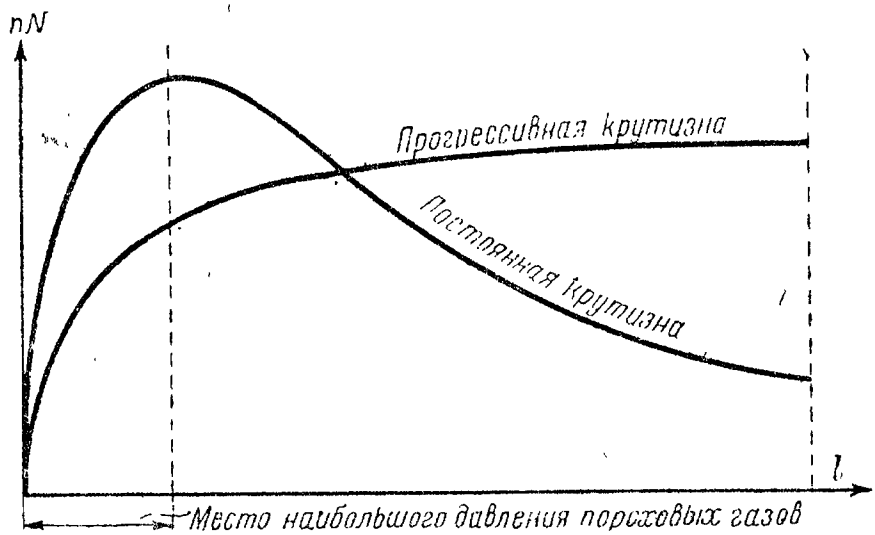
что при $\nu=0{,}176$ дает угол $\beta=80°$.

Графическое изображение $N=F(l)$ при нарезках постоянной и прогрессивной крутизны представлено на фиг. 22 по данным Нобля для 12-*см* пушки для двух разных снарядов, а также на фиг. 23 по данным Гейденрейха.



Фиг. 22.

На графике ясно видно примерное постоянство нормальной реакции на боевую грань в случае нарезки прогрессивной кру-



Фиг. 23.

тизны. Кроме того, можно отметить преобладающее влияние второго слагаемого числителя выражения для N в случае прогрессивной нарезки во второй половине пути снаряда.

§ 11. СОПРОТИВЛЕНИЕ НАРЕЗОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ СНАРЯДА ПО КАНАЛУ СТВОЛА

Отрицательный член правых частей уравнений поступательного движения снаряда (13, 18) представляет собою то сопро-

тивление, которое оказывают нарезы при движении снаряда по каналу ствола орудия.

Рассмотрим более простой случай, когда не учитывается сила Ф и $\delta_N = 90°$.

Обозначив сопротивление нарезов через R, найдем:

$$R = nN(\sin\beta + \nu\cos\beta) = nN\cos\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu),$$

$$R = \frac{nN(\operatorname{tg}\beta + \nu)}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}}, \tag{22}$$

или, подставляя значение N из уравнения 17, получим:

$$R = \frac{\mu\left(p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta + \frac{q}{g} v^2 \frac{d\operatorname{tg}\beta}{dx}\right)(\operatorname{tg}\beta + \nu)}{1 + \mu\operatorname{tg}^2\beta - \nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}. \tag{23}$$

Сопротивление R, как и нормальная реакция боевой грани N, пропорционально коэфициенту инерции μ.

Часть сопротивления, связанная с первым слагаемым в числителе, пропорциональна давлению на дно снаряда. Эта часть сопротивления после максимума будет убывать к дульному срезу. Часть сопротивления, связанная со вторым слагаемым, как и в формуле для N, имеет место лишь при нарезке прогрессивной крутизны, увеличиваясь с увеличением пути снаряда и достигая в дульном срезе величин, бо́льших части, пропорциональной $p_{\text{сн}}$.

В случае учета реакции пояска Ф в числителе формулы для сопротивления R будет еще член

$$\nu n\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}\,\Phi,$$

который, завися от силы Ф, будет убывать с увеличением пути снаряда.

Величина этой части сопротивления может быть много больше части сопротивления, пропорциональной давлению на дно снаряда $p_{\text{сн}}$. Как показывает расчет, такое соотношение между этими частями сопротивления может существовать даже в момент достижения наибольшего давления.

Для случая нарезки постоянной крутизны, из формулы для R (23) при $\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dx} = 0$, будем иметь:

$$R = \mu\frac{p_{\text{сн}} s \operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu)}{1 + \mu\operatorname{tg}^2\beta - \nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}. \tag{24}$$

Как было указано выше, знаменатель при существующих значениях β, μ и ν вследствие его малого изменения с изменением угла β можно считать постоянным и равным единице. Тогда

приближенная величина сопротивления представится следующей формулой:

$$R=\mu\, p_{\text{сн}}\, s\, \operatorname{tg}\beta\,(\operatorname{tg}\beta+\nu). \tag{25}$$

Между прочим для нарезов с углом $\beta=0$ остается только сть сопротивления, зависящая от реакции пояска Ф.

РАБОТА, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ПРЕОДОЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОКАЗЫВАЕМОГО НАРЕЗАМИ

Обозначая по предыдущему сопротивление нарезов через R, работу, затрачиваемую на преодоление сопротивления, оказываемого нарезами, можно представить в виде определенного интеграла:

$$\int_0^l R\,dl. \tag{26}$$

С другой стороны, эта работа будет слагаться из работы, затрачиваемой на вращение снаряда, и работы, затрачиваемой на преодоление трения в нарезах. Таким образом, будем иметь:

$$\int_0^l R\,dl=\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3,$$

где через $\mathbf{A}_3$ обозначена работа, затрачиваемая на преодоление трения только о боевую грань нарезов, так как трение о поле и дно нарезов, связанное с силой Ф, как указывалось выше, не учитывается. Трением центрирующих частей снаряда о стенки канала пренебрегают вследствие его малости. $\mathbf{A}_2$ — определенная выше работа, затрачиваемая на вращательное движение снаряда.

Выражение для работы сопротивления нарезов в общем случае прогрессивной нарезки получается очень сложным.

Так как чаще приходится иметь дело с формулами для учета второстепенных работ при нарезке постоянной крутизны, рассмотрим здесь именно этот случай, не учитывая при этом работу, связанную с силой Ф, величину которой мы можем получить только экспериментальным путем.

Вводя под знак интеграла значение R из уравнения 25, найдем:

$$\int_0^l \mu \operatorname{tg}\beta\,(\operatorname{tg}\beta+\nu)ps\,dl=\mu \operatorname{tg}\beta\,(\operatorname{tg}\beta+\nu)\int_0^l ps\,dl.$$

Интеграл

$$\int_0^l ps\,dl$$

является работой давления на дно снаряда; для упрощения, приближенно, можно считать ее равной живой силе снаряда $\frac{qv^2}{2g}$. Тогда

$$\int_0^l R dl = \mu \operatorname{tg}\beta (\operatorname{tg}\beta + \nu) \frac{qv^2}{2g} = \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3.$$

Отсюда, принимая во внимание уравнение 9, имеем:

$$\mu \operatorname{tg}\beta (\operatorname{tg}\beta + \nu) \frac{qv^2}{2g} = \frac{qv^2}{2g} \mu \operatorname{tg}^2\beta + \mathbf{A}_3$$

или

$$\mathbf{A}_3 = \frac{qv^2}{2g} (\nu\mu \operatorname{tg}\beta + \mu \operatorname{tg}^2\beta - \mu \operatorname{tg}^2\beta),$$

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta. \tag{27}$$

Полученное выражение представляет собою *работу на преодоление трения только о боевую грань для случая постоянной крутизны нарезки.*

Величина работы $\mathbf{A}_3$ колеблется в пределах от 1 до $2^0/_0$ от $\mathbf{A}_1$.

Итак, *работа на преодоление сопротивления нарезов* выразится следующим образом:

$$\mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3 = \frac{qv^2}{2g} \mu \operatorname{tg}\beta (\operatorname{tg}\beta + \nu). \tag{28}$$

Работу, затрачиваемую на преодоление трения, получим также следующим образом:

$$d\mathbf{A}_3 = n\nu (N + \Phi) \frac{dl}{\cos\beta},$$

где $\frac{dl}{\cos\beta}$ — путь снаряда по линии нареза.

Не учитывая работы трения от силы Φ и понимая, таким образом, под работой $\mathbf{A}_3$ лишь работу трения о боевую грань, найдем :

$$d\mathbf{A}_3 = n\nu N \frac{dl}{\cos\beta}.$$

Подставляя значение N из приближенного уравнения (§ 9), имеем:

$$d\mathbf{A}_3 = n\nu \frac{\mu}{n} \frac{ps \operatorname{tg}\beta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}}{\cos\beta} dl.$$

Интегрируя в соответствующих пределах, получаем:

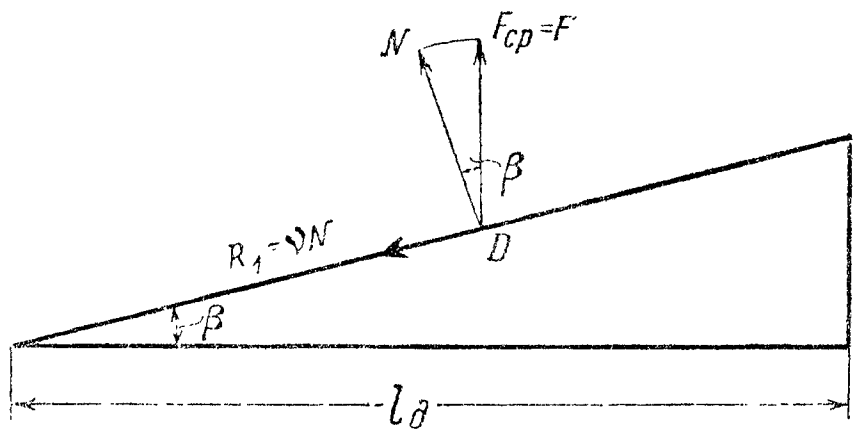
$$\mathbf{A}_3 = \nu p \operatorname{tg} \beta \int_0^l ps\, dl.$$

Считая приближенно, что интеграл $\int_0^l ps\, dl$ равен живой силе снаряда, окончательно имеем полученное ранее выражение 27 для $\mathbf{A}_3$:

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_1 \nu p \operatorname{tg} \beta.$$

Работу трения о боевую грань можно получить также из следующих соображений.

Развернув поверхность канала на плоскости (фиг. 24) и взяв один нарез, приложим к снаряду, находящемуся в точке D, силы, возникающие вследствие наличия нарезов: силу F, вызывающую вращение, и силу трения R_1.



Фиг. 24.

Для работы трения о боевую грань (работа трения вследствие реакции пояска, как указывалось выше, не учитывается), будем иметь:

$$\mathbf{A}_3 = R_1 \frac{l_д}{\cos \beta}, \tag{29}$$

где $\frac{l_д}{\cos \beta}$ есть путь снаряда по линии нареза.

Принимая для простоты силу F постоянной и равной $F_{ср}$, зная, кроме того, что $R_1 = \nu N$, где ν — попрежнему коэфициент трения, а N — нормальная реакция боевой грани, получим:

$$R_1 = \nu \frac{F_{ср}}{\cos \beta},$$

и, следовательно, подставляя R_1 в последнее выражение для $\mathbf{A}_3$ (29), будем иметь:

$$\mathbf{A}_3 = \nu F_{ср} \frac{l_д}{\cos^2 \beta}. \tag{30}$$

Величину $F_{ср}$ определим из выражения для работы вращательного движения снаряда, которое представим в следующем виде:

$$\mathbf{A}_2 = F_{ср}\,\frac{d}{2}\,\frac{l_д\,2\pi}{\pi d\,\operatorname{cotg}\beta} = F_{ср}\,\frac{l_д}{\operatorname{cotg}\beta},$$

откуда

$$F_{ср} = \frac{\mathbf{A}_2 \operatorname{cotg}\beta}{l_д}.$$

Следовательно, подставляя $F_{ср}$ в уравнение 30, получим:

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_2 \nu\,\frac{\operatorname{cotg}\beta}{\cos^2\beta} = \mathbf{A}_2 \nu \operatorname{cotg}\beta\,(1+\operatorname{tg}^2\beta),$$

или, подставляя значение $\mathbf{A}_2$ из формулы 9, найдем:

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_2 \nu\mu\,\operatorname{tg}\beta\,(1+\operatorname{tg}^2\beta).$$

Принимая во внимание малую величину $\operatorname{tg}^2\beta$ по сравнению с единицей, окончательно получим:

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta.$$

Для работы сопротивления нарезов при нарезке постоянной крутизны проф. Кранц вместо формулы 28 дает следующую формулу:

(31) $$\mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3 = \frac{qv^2}{2g}\,\mu \operatorname{tg}\beta\,\frac{\nu + g\,\beta}{1-\nu \operatorname{tg}\beta}.$$

Эта формула получается из уравнения поступательного движения снаряда

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{сн}S - R.$$

Если подставить в это уравнение значение:

$$R = \mu\,\frac{p_{сн}S \operatorname{tg}\beta\,(\operatorname{tg}\beta+\nu)}{1+\mu\operatorname{tg}^2\beta - \nu\,(1-\mu)\operatorname{tg}\beta},$$

то найдем:

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{сн}S - \mu \operatorname{tg}\beta\left(\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1+\mu\operatorname{tg}^2\beta - \nu\,(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}\right)p_{сн}S$$

или

$$\frac{q}{g}\frac{dv}{dt} = p_{сн}S\left[1-\mu\operatorname{tg}\beta\,\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1+\mu\operatorname{tg}^2\beta - \nu\,(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}\right] =$$

$$= p_{сн}S\left[\frac{1-\nu\operatorname{tg}\beta}{(1+\mu)\operatorname{tg}^2\beta - \nu\,(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}\right];$$

отсюда имеем:

$$p_{\text{сн}}S=\left[\frac{(1+\mu)\operatorname{tg}^2\beta-\nu(1-\mu)\operatorname{tg}\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}\right]\frac{q}{g}\frac{dv}{dt}$$

или

$$p_{\text{сн}}S=\left[1+\mu\operatorname{tg}\beta\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}\right]\frac{q}{g}\frac{dv}{dt}. \tag{32}$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках правой части полученного уравнения, представляет собой приближенное значение коэфициента фиктивности $\varphi_{\text{н}}$, учитывающего работу сопротивления нарезов:

$$\varphi_{\text{н}}=1+\mu\operatorname{tg}\beta\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}; \tag{33}$$

следовательно можно написать приближенное выражение работы пороховых газов $\mathbf{A}'$:

$$\mathbf{A}'=\varphi_{\text{н}}\frac{qv^2}{2g}=\varphi_{\text{н}}\mathbf{A}_1$$

или

$$\mathbf{A}'=\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3=\varphi_{\text{н}}\mathbf{A}_1,$$

откуда находим ранее полученное выражение 28

$$\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3=\mathbf{A}_1(\varphi_{\text{н}}-1)=\mathbf{A}_1\mu\operatorname{tg}\beta\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}.$$

Из этого уравнения можно получить выражение работы $\mathbf{A}_3$ в следующем виде:

$$\mathbf{A}_3=\mathbf{A}_1\nu\mu\operatorname{tg}\beta\frac{1+\operatorname{tg}^2\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}. \tag{34}$$

Для случая нарезки прогрессивной крутизны проф. Кранц дает формулу:

$$\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3=\frac{qv^2}{2g}\mu\frac{\nu+\operatorname{tg}\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta}\left[\operatorname{tg}\beta+v^2\left(\frac{dv}{dt}\right)^{-1}\frac{d\operatorname{tg}\beta}{dx}\right]. \tag{35}$$

Проф. Н. А. Забудский для различных пушек дает значение $(\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3)$, равное от 1,29 до 2,86% от величины работы $\mathbf{A}_1$.

Задачи 12—19. **Вычисление работы $\mathbf{A}_3$**

12) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Работа, вычисленная в задаче 1	$\mathbf{A}_1=362\cdot10$ *кгдм*.
Коэфициент трения	$\nu=0{,}176$.
Коэфициент инерции снаряда	$\mu=0{,}450$.
Угол наклона нарезов	$\beta=5°41{,}6'$.

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta = 28{,}6\ кгдм = 0{,}003\ тм.$$

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{28{,}6}{362 \cdot 10} = 0{,}0079 = 0{,}79\%.$$

$$A_2 + A_3 = 16{,}2 + 28{,}6 = 44{,}8\ кгдм = 0{,}005\ тм.$$

$$\frac{A_2 + A_3}{A_1} = \frac{44{,}8}{362 \cdot 10} = 0{,}0124 = 1{,}24\%.$$

	$\lg A_1$	3,5586
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,6532
(+)	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2}$,9986
	$\lg A_3$	1,4559
	A_3	28,57

13) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Работа, вычисленная в задаче 2 . . . . . $A_1 = 1154 \cdot 10^3$ *кгдм*.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}560$.
Угол наклона нарезов . . . . . $\beta = 5°59'$.

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta = 119 \cdot 10^2\ кгдм = 1{,}19\ тм.$$

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{1192 \cdot 10}{1154 \cdot 10^3} = 0{,}01033 = 1{,}03\%.$$

$$A_2 + A_3 = 71 \cdot 10^2 + 119 \cdot 10^2 = 190 \cdot 10^2\ кгдм = 1{,}901\ тм.$$

$$\frac{A_2 + A_3}{A_1} = \frac{190 \cdot 10^3}{1154 \cdot 10^3} = 0{,}0165 = 1{,}65\%.$$

	$\lg A_1$	6,0625
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,7482
(+)	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{1}$,0200
	$\lg A_3$	4,0762
	A_3	1192,10

14) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Работа, вычисленная в задаче 3 . . . . . $A_1 = 1314 \cdot 10^3$ *кгдм*.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}580$.
Угол наклона нарезов . . . . . $\beta = 8°56'$.

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta = 211 \cdot 10^2\ кгдм = 2{,}11\ тм.$$

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{211 \cdot 10^2}{1314 \cdot 10^3} = 0{,}0160 = 1{,}60\%.$$

$$A_2 + A_3 = 188 \cdot 10^2 + 211 \cdot 10^2 = 399 \cdot 10^2\ кгдм = 3{,}99\ тм.$$

$$\frac{A_2 + A_3}{A_1} = \frac{399 \cdot 10^2}{1314 \cdot 10^3} = 0{,}304 = 3{,}04\%.$$

	$\lg A_1$	6,1185
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,7634
(+)	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	1,1965
	$\lg A_3$	4,3239
	A_3	$2108 \cdot 10$

15) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Работа, вычисленная в задаче 5 . . . . . $A_1 = 1571 \cdot 10^5$ *кгдм*.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}530$.
Угол наклона нарезов . . . . . $\beta = 5°59'$.

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta = 154 \cdot 10^4 \text{ кгдм} = 154 \text{ тм}.$$

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{154 \cdot 10^4}{1571 \cdot 10^5} = 0{,}0979 = 0{,}98\%.$$

$$A_2 + A_3 = 92 \cdot 10^4 + 154 \cdot 10^4 =$$

$$= 246 \cdot 10^4 \text{ кгдм} = 246 \text{ тм}.$$

$$\frac{A_2 + A_3}{A_1} = \frac{246 \cdot 10^4}{1571 \cdot 10^5} = 0{,}0157 = 1{,}57\%.$$

	$\lg A_1$	8,1964
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,7243
(+)	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	1,0209
	$\lg A_3$	6,1871
	A_3	$1538 \cdot 10^3$

16) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные (те же, что в задаче 12).

Вычисление производим по формуле:

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta \frac{1 + \operatorname{tg}^2\beta}{1 - \nu \operatorname{tg}\beta} = 29{,}4 \text{ кгдм}.$$

Сравнивая полученный результат с величиной A_3, полученной при расчете по формуле

$$A_3 = A_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta,$$

где $A_3 = 28{,}6$ *кгдм*, видим, что разница между значениями A_3, вычисленными по этим двум формулам, равняется

$$29{,}4 - 28{,}6 = 0{,}8 \text{ кгдм},$$

что составляет приблизительно 3%.

	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
(+)	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2}$,9986
	$\lg \nu \operatorname{tg}\beta$	2,2441
	$\nu \operatorname{tg}\beta$	0,0175
	$1 - \nu \operatorname{tg}\beta$	0,9825
	$\lg \operatorname{tg}^2\beta$	$\bar{3}$,9972
	$\operatorname{tg}^2\beta$	0,0099
	$1 + \operatorname{tg}^2\beta$	1,0099
	$\lg (1 + \operatorname{tg}^2\beta)$	0,0043
	$\operatorname{colg} (1 - \nu \operatorname{tg}\beta)$	0,0077
(+)	$\lg A_1$	3,5586
	$\lg \mu$	$\bar{1}$,6532
	$\lg \nu$	$\bar{1}$,2455
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2}$,9986
	$\lg A_3$	1,4679
	A_3	29,37

17) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные (те же, что в задаче 13).

Вычисление производим по формуле:

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta \frac{1+\operatorname{tg}^2\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta} = 123\cdot 10^2 \text{ кгдм}.$$

	$\lg \operatorname{tg}^2\beta$	$\bar{2},0400$
	$\operatorname{tg}^2\beta$	0,0110
	$1+\operatorname{tg}^2\beta$	1,0110
(+)	$\lg\nu$	$\bar{1},2455$
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{1},0200$
	$\lg\nu \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2},2655$
	$\nu \operatorname{tg}\beta$	0,0184
	$1+\nu \operatorname{tg}\beta$	0,9816
	$\operatorname{colg}(1-\nu \operatorname{tg}\beta)$	0,0080
(+)	$\lg(1+\operatorname{tg}^2\beta)$	0,0047
	$\lg A_1\mu\nu \operatorname{tg}\beta$	4,0762
	$\lg A_3$	4,0889
	A_3	$1228\cdot 10$

Сравнивая полученный результат с величиной A_3, полученной при расчете по формуле:

$$A_3 = A_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta,$$

где $A_3 = 1192\cdot 10$ *кгдм*, видим, что разница между значениями A_3, вычисленными по этим двум формулам, равняется

$$123\cdot 10^2 - 119\cdot 10^2 = 4\cdot 10^2 \text{ кгдм},$$

что составляет приблизительно 3%.

18) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные (те же, что в задаче 14).

Вычисление производим по формуле:

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta \frac{1+\operatorname{tg}^2\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta} = 222\cdot 10^2 \text{ кгдм}.$$

	$\lg \operatorname{tg}^2\beta$	$\bar{2},3930$
	$\operatorname{tg}^2\beta$	0,0247
	$1+\operatorname{tg}^2\beta$	1,0247
(+)	$\lg\nu$	$\bar{1},2455$
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{1},1965$
	$\lg\nu \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2},4420$
	$\nu \operatorname{tg}\beta$	0,0277
	$1-\nu \operatorname{tg}\beta$	0,9723
	$\operatorname{colg}(1-\nu \operatorname{tg}\beta)$	0,0122
(+)	$\lg(1+\operatorname{tg}^2\beta)$	0,0107
	$\lg A_1\mu\nu \operatorname{tg}\beta$	4,3239
	$\lg A_3$	4,3468
	A_3	$2222\cdot 10$

Сравнивая полученный результат с величиной A_3, полученной при расчете по формуле:

$$A_3 = A_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta,$$

где $A_3 = 2108\cdot 10$ *кгдм*, видим, что разница между значениями A_3, вычисленными по этим двум формулам, равняется

$$222\cdot 10^2 - 211\cdot 10^2 = 11\cdot 10^2 \text{ кгдм},$$

что составляет приблизительно 5%.

19) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные (те же, что в задаче 15).

Вычисление производим по формуле:

$$A_3 = A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta \frac{1+\operatorname{tg}^2\beta}{1-\nu\operatorname{tg}\beta} = 158\cdot 10^4 \text{ кгдм.}$$

	$\lg \operatorname{tg}^2\beta$	$\bar{2},0418$
	$\operatorname{tg}^2\beta$	0,0110
	$1+\operatorname{tg}^2\beta$	1,0110
(+)	$\lg \nu$	$\bar{1},2455$
	$\lg \operatorname{tg}\beta$	$\bar{1},0209$
	$\lg \nu \operatorname{tg}\beta$	$\bar{2},2664$
	$\nu \operatorname{tg}\beta$	0,0185
	$1-\nu\operatorname{tg}\beta$	0,9815
	$\operatorname{colg}(1-\nu\operatorname{tg}\beta)$	0,0081
(+)	$\lg(1+\operatorname{tg}^2\beta)$	0,0047
	$\lg A_1 \mu\nu \operatorname{tg}\beta$	6,1871
	$\lg A_3$	6,1999
	A_3	$1584\cdot 10^3$

Сравнивая полученный результат с величиной A_3, полученной при расчете по формуле:

$$A_3 = A_1 \nu\mu \operatorname{tg}\beta,$$

где $A_3 = 1538\cdot 10^3$ *кгдм*, видим, что разница между значениями A_3, вычисленными по этим двум формулам, равняется

$$158\cdot 10^4 - 154\cdot 10^4 = 4\cdot 10^4 \text{ кгдм,}$$

что составляет приблизительно 3%.

§ 13. РАБОТА ТРЕНИЯ ПРИ НАРЕЗКАХ ПОСТОЯННОЙ И ПРОГРЕССИВНОЙ КРУТИЗНЫ

Сравним между собой работы, затрачиваемые на преодоление трения о боевую грань, при постоянной и прогрессивной крутизне нарезов.

Примем для обеих нарезок одинаковую крутизну в дульном срезе. Не учитывая реакции пояска Ф, работу, затрачиваемую на трение, на основании выражения для $dA_3 = n\nu N \frac{dl}{\cos\beta}$, полученного выше (§ 12), представим следующим образом:

$$A_3 = n\nu N_{ср} \frac{l_д}{\cos\beta}, \tag{36}$$

где $N_{ср}$—среднее значение нормальной реакции боевой грани, которую можно получить из условия равенства живых сил вращательного движения при переменной действительной реакции N и постоянной $N_{ср}$.

На основании известных из механики зависимостей имеем:

$$A_2 = J\frac{\omega^2}{2} = J\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^2,$$

где γ—угол поворота снаряда в орудии.

Работа постоянной величины нормальной реакции боевой грани $nN_{ср}$ будет равна:

$$nN_{ср}\left(\frac{\gamma d'}{2}\right),$$

где $\gamma\frac{d'}{2}$ есть длина дуги или путь снаряда.

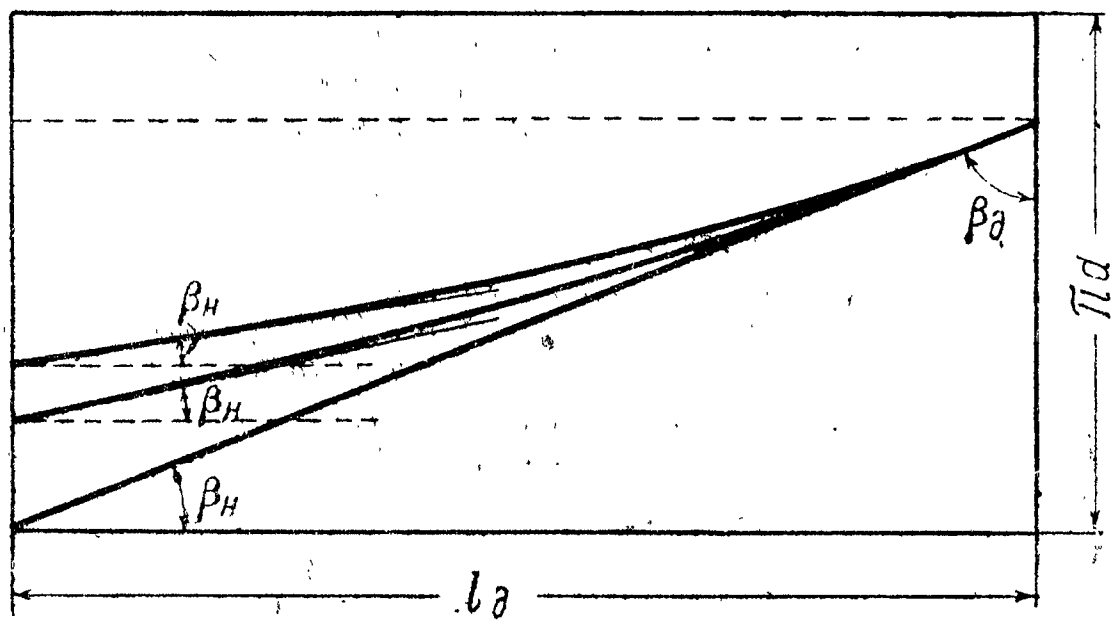
Приравнивая ее работе вращательного движения снаряда на том же пути, найдем:

$$A_2 = J\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^2 = nN_{ср}\,\gamma\frac{d'}{2},$$

откуда

(37) $$N_{ср} = \frac{2A_2}{nd'}\cdot\frac{1}{\gamma}.$$

Отсюда ясно, что для требуемой живой силы вращательного



Фиг. 25.

движения снаряда постоянное среднее значение нормальной реакции боевой грани $N_{ср}$ обратно пропорционально углу поворота снаряда γ. В такой же зависимости по отношению к γ будет находиться и работа трения.

Следовательно, *работа трения о боевую грань при постоянной крутизне нарезки будет меньше, чем при прогрессивной крутизне.*

Сравнивая длину пути выступа пояска по линии нареза для прогрессивной и постоянной крутизны нарезки при одном и том же значении $\beta_д$ на заданной длине $l_д$, получим (фиг. 25), что для случая постоянной нарезки путь будет наибольший, а следовательно, и угол поворота будет больше.

Можно показать, что угол поворота снаряда γ для нарезки постоянной крутизны будет равен

$$\gamma_1 = \frac{l_д}{d'}2\operatorname{tg}\beta_д,$$

тогда как для прогрессивной в случае, например, параболической нарезки:

$$\gamma_2 = \frac{l_д}{d'}(\operatorname{tg}\beta_д + \operatorname{tg}\beta_н),$$

где $\beta_д$ и $\beta_н$ — углы наклона нарезов в дульном срезе и в начале нарезки.

Сравнивая между собой γ_1 и γ_2, видим, что

$$\gamma_1 > \gamma_2.$$

Задача 20. **Вычисление работы, затрачиваемой на трение о боевую грань при нарезках постоянной и прогрессивной крутизны**

Испанская 150-*мм* пушка системы M. Argüelles.

Исходные данные

Калибр	d	$= 1{,}5$ *дм*.
Дульная скорость	$v_д$	$= 7470$ *дм/сек*.
Вес снаряда	q	$= 50{,}0$ *кг*.
Площадь поперечного сечения канала	s	$= 1{,}793$ *дм*^{2}.
Длина нарезной части	$l_д$	$= 56{,}96$ *дм*.
Число нарезов	n	$= 42$.
Угол наклона нарезов начальн.	$\beta_н$	$= 1°44'$ $(\operatorname{tg}\beta_н = 0{,}0303)$.
„ „ „ у дула	$\beta_д$	$= 7°10'$ $(\operatorname{tg}\beta_д = 0{,}1258)$.
Коэфициент трения	ν	$= 0{,}176$.
Коэфициент инерции снаряда	μ	$= 0{,}560$.

Воспользуемся формулами:

$$A_з = n\nu N_{ср}\frac{l_д}{\cos\beta} \quad \text{и} \quad N_{ср} = \frac{2A_2}{nd'}\frac{1}{\gamma},$$

где γ есть угол поворота снаряда.

Работу трения можно выразить:

$$A_з = \frac{qv_д^2}{g}\frac{\nu\mu l_д \operatorname{tg}^2\beta_д\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta_д}}{d'}\frac{1}{\gamma} = B\frac{1}{\gamma}.$$

Для постоянной нарезки

$$\gamma_1 = \frac{l_д}{d'}2\operatorname{tg}\beta_д.$$

Для параболической нарезки

$$\gamma_2 = \frac{l_д}{d'}(\operatorname{tg}\beta_д + \operatorname{tg}\beta_н),$$

где

$$d' = \sqrt{\frac{4s}{\pi}}.$$

Вычисляем работы трения о боевую грань $A_{з\ пост}$ и $A_{з\ параб}$ для одной и той же длины нарезной части $l_д$.

	$\lg \operatorname{tg} \beta_д$	$\bar{1},0993$		$\lg v_д$	3,8733
	$2 \lg \operatorname{tg} \beta_д$	$\bar{2},1986$		$2 \lg v_д$	6,7466
	$(1 + \operatorname{tg}^2 \beta_д)$	1,0158		$\lg q$	1,6990
	$\lg (1 + \operatorname{tg}^2 \beta_д)$	0,0069		$\lg \nu$	$\bar{1},2455$
				$\lg \mu$	$\bar{1},7482$
	$\lg 4$	0,6021	(+)	$\lg l_д$	1,7556
(+)	$\lg s$	0,2536		$2 \lg \operatorname{tg} \beta$	$\bar{2},1986$
	$\operatorname{colg} \pi$	$\bar{1},5028$		$\frac{1}{2} \lg (1 + \operatorname{tg}^2 \beta_д)$	0,0034
	$\lg \left(\frac{4s}{\pi}\right)$	0,3585		$\operatorname{colg} g$	$\bar{2},0083$
	$\lg d'$	0,1792		$\operatorname{colg} d'$	$\bar{1},8208$
	d'	1,511		$\lg B$	5,2270
	$\lg l_д$	1,7556		B	$1687 \cdot 10^2$
(+)	$\lg 2$	0,3010		$\lg B$	5,2270
	$\lg \operatorname{tg} \beta_д$	$\bar{1},0993$	(+)		
	$\operatorname{colg} d'$	$\bar{1},8208$		$\operatorname{colg} \gamma_1$	$\bar{1},0233$
	$\lg \gamma_1$	0,9767		$\lg A_{з\ пост}$	4,2503
	$(\operatorname{tg} \beta_д + \operatorname{tg} \beta_н)$	0,1561		$A_{з\ пост}$	1779·10
	$\lg (\operatorname{tg} \beta_д + \operatorname{tg} \beta_н)$	$\bar{1},1934$		$\lg A_{з\ пост}$	4,2503
(+)	$\lg l_д$	1,7556	(+)	$\lg \gamma_1$	0,9767
	$\operatorname{colg} d'$	$\bar{1},8206$		$\operatorname{colg} \gamma_2$	1,2302
	$\lg \gamma_2$	0,7698		$\lg A_{з\ параб}$	4,4572
				$A_{з\ параб}$	2865·10

$$A_{з\ пост} = 178 \cdot 10^2 \ кгдм.$$

$A_{з\ параб}$ определяем, исходя из того, что

$$\frac{A_{з\ параб}}{A_{з\ пост}} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2},$$

$$A_{з\ параб} = 286 \cdot 10^2 \ кгдм.$$

Таким образом работа, затрачиваемая на трение о боевую грань при постоянной крутизне нарезки, меньше работы, затрачиваемой на трение при прогрессивной крутизне на той же

длине нарезной части $l_д$ при условии одинаковой крутизны у дула. В данном случае получаем:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2}=1{,}61.$$

§ 14. ФОРМА И ПРОФИЛЬ НАРЕЗОВ

Вопросы расчета прочности нарезов и ведущего пояска снаряда, а также детали их устройства относятся к области проектирования орудий и снарядов. Здесь же необходимо остановиться на вопросе выбора того или иного профиля и характера нарезки канала.

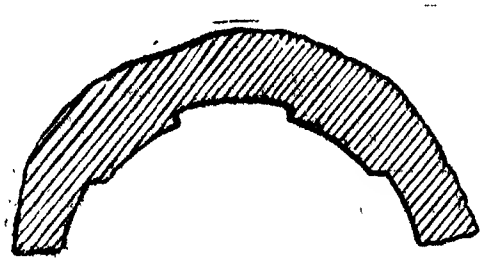
Для определения угла наклона нарезов у дульного среза $\beta_д$ имеется ряд эмпирических и полуэмпирических формул, обеспечивающих правильность полета снаряда на начальном участке.

Как было указано в § 6, угол наклона β изменяется в следующих пределах: для пушек от 6 до 7° и для гаубиц от 9 до 12° в дульном срезе.

Переход от каморы к нарезной части должен быть плавным для более легкого врезания ведущего пояска.

Очертание нареза обычно принимается с гранями, параллельными радиусу, проведенному в середину нареза (угол $\delta_N=90°$) (фиг. 26 и 27).

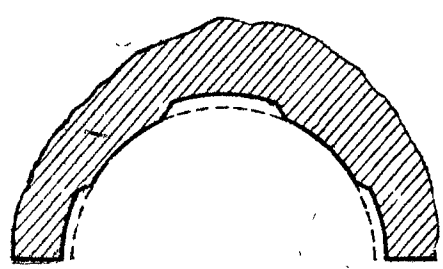
Фиг. 26.



Фиг. 27.

В отношении величины нормальной реакции боевой грани N и сопротивления нарезов R такой профиль нарезов имеет

Фиг. 28.

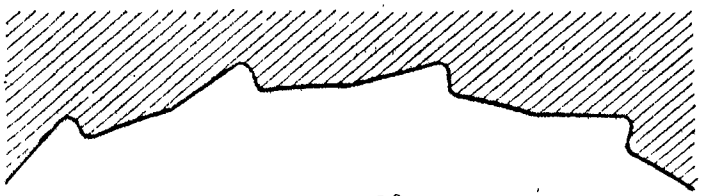


По Корцену

Фиг. 29.

определенное преимущество перед нарезами со скошенной боевой гранью (фиг. 28 и 29), а также перед нарезами с фигурным профилем, например, такими, которые применяются во флоте США (фиг. 30) или в английских орудиях, нарезка Мэйтлэнда (фиг. 31).

В отношении прочности поля нареза более надежной является нарезка со скошенной боевой гранью. Что касается нарезок фигурной формы, то в них достигается большая плавность перехода от поля ко дну нарезов, что является необходимым для уменьшения износа нарезов (см. об износе орудий, гл. III). Относительно профиля нарезов последнего типа определенных заключений нет.

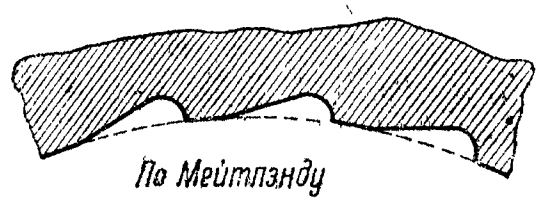


Фиг. 30.

В отношении размеров нареза обычно придерживаются следующих соотношений: ширина поля нареза у орудий изменяется от 2,5 до 4,5 *мм* а ширина дна нареза берется в 2—3 раза больше.

В винтовках это соотношение несколько изменяется. Число нарезов обычно 4, за редкими исключениями, при ширине поля нареза от 2,0 до 2,5 *мм*.

Глубина нарезов в орудиях делается около 0,005 *d* до 0,01 *d*, тогда как в винтовках она колеблется примерно от 0,1 до 0,2 *мм*.



По Мейтцэнду

Фиг. 31.

Вопрос о том, какая нарезка выгоднее — постоянная или прогрессивная, — является пока спорным. Каждый вид нарезки имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Некоторые авторы (особенно Юстров и Кранц) считают более выгодной прогрессивную нарезку, при которой в нарезах и выступах ведущего пояска возникают меньшие напряжения.

Юстров не придает особого значения отрицательным сторонам нарезки прогрессивной крутизны, именно: а) техническим трудностям изготовления, б) уменьшению рабочей поверхности боевой грани, в) большему износу выступов пояска вследствие большей работы трения, г) износу пояска, способствующему прорыву пороховых газов, связанному с большим выгоранием и снижением балистических качеств системы.

Признавая некоторые технологические и балистические преимущества у нарезки постоянной крутизны, Юстров указывает на сильный износ начального участка пути вследствие трения. Давление на выступы пояска на 25—30% выше, чем при параболической нарезке, а в месте наибольшего давления (p_m) может превосходить даже 100%.

На основании опыта мировой войны Юстров утверждает, что при прогрессивной нарезке повышается срок службы орудия.

А. Г. Матюнин также считает, что прогрессивная нарезка более выгодна в отношении износа орудия.

Кроме того, А. Г. Матюнин, исходя из соображений уменьшения стирания и деформаций нарезов на начальном участке

нарезной части, которая больше всего изнашивается, предложил нарезы смешанной крутизны.

Для сохранения нарезов начальная часть нарезов должна служить только для прорезки выступов на ведущем пояске, а потому нарезы на этом участке от начала нарезов должны быть прямыми. Затем они должны входить в прогрессивную нарезку, рассчитанную так, чтобы в расстоянии 4—5 калибров от дульного среза нарезы достигали необходимого угла наклона, который остается постоянным до дульного среза.

Устройство такой нарезки А. Г. Матюнин считает возможным, принимая во внимание достаточно большую относительную длину канала современных пушек.

Интересно привести данные А. Г. Матюнина для величины nN, вычисленные в случае различных нарезок для 152-*мм* пушки Канэ, помещенные в табл. 4 и графически представленные на фиг. 32.

Таблица 4

Расстояние от дна канала в дюймах	Нормальн. реакция боевой грани nN в тоннах			
	Нарезка постоянной крутизны	Нарезка прогрессивной крутизны	Нарезка смешанной крутизны	
			Первоначальн. уклон 0°	Первоначальн. уклон 1°56′30″
40,44	0	0	0	0
44,44	17,1	7,5	0	0
48,44	21,6	10,0	0	0
52,44	24,1	11,8	0	0
56,44	24,8	12,7	0	0
60,44	25,0	13,4	0	0
64,44	25,4	14,4	0	0
78,00	23,9	16,1	10,2	14,6
84,92	22,3	16,6	12,8	15,9
96,00	20,3	17,5	16,5	17,7
110,90	17,6	17,6	20,6	19,6
132,00	14,5	18,1	25,3	21,8
159,41	11,6	18,7	29,9	23,9
204,00	8,4	19,5	35,1	26,6
250,00	—	—	38,3	28,0
281,34	5,5	20,8	—	—

Проф. Швиннинг также отдает предпочтение прогрессивной крутизне нарезки. Вместе с тем он считает, что наиболее выгодной нарезкой будет нарезка смешанной крутизны, у которой участок от начала нарезной части до места наибольшего давления будет иметь постоянную крутизну, а от места наибольшего давления пойдет участок прогрессивной крутизны, имеющий необходимый угол наклона нарезов в дульном срезе. При этом, конечно, переход от постоянной крутизны к переменной не должен вызывать резкого изменения в реакции боевой грани.

Отрицательные стороны прогрессивной нарезки, а именно: увеличение зазоров на пояске со стороны холостых граней и связанное с этим ухудшение обтюрации и условий движения снаряда по нарезам, в предлагаемой нарезке не будут сказываться на наиболее неблагоприятном участке до места наибольшего давления.

Сравнительный характер изменения нормальной реакции боевой грани для смешанной, а также и других нарезок дан на фиг. 33.

Целый ряд преимуществ как в отношении величины и характера изменения нормальной реакции боевой грани, так и со стороны технологической имеется у синусоидальной нарезки (Браун).

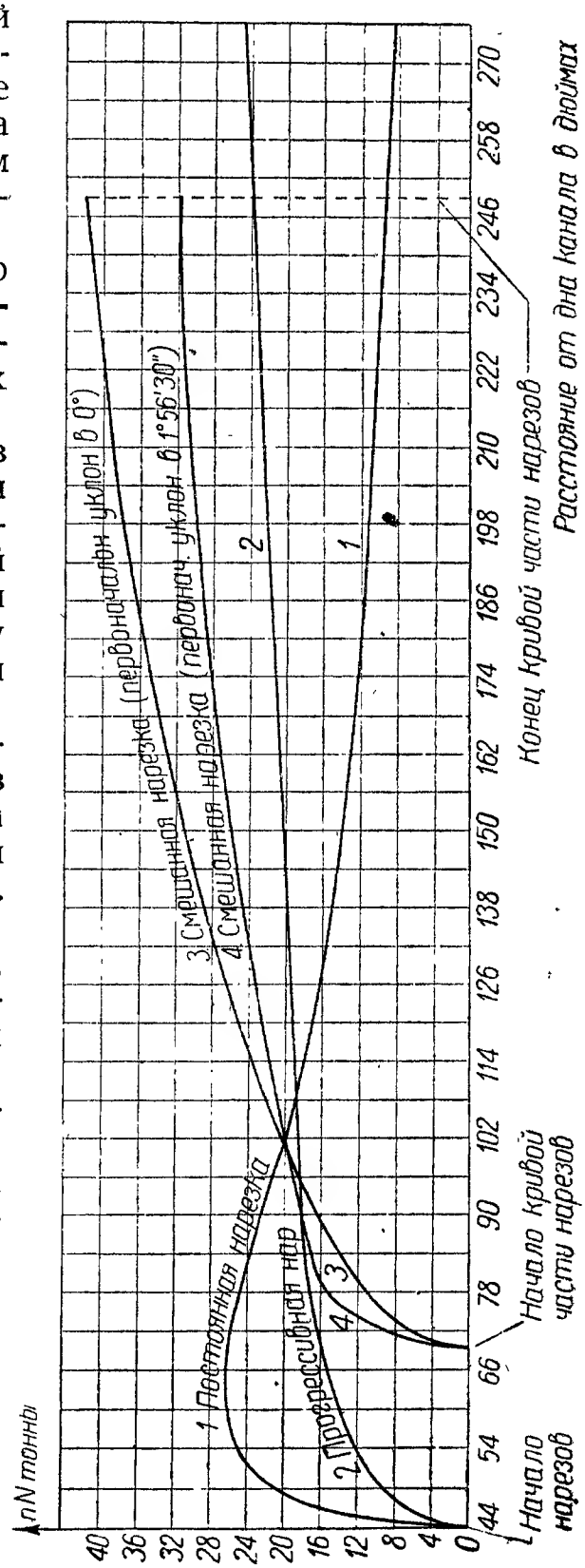
Наконец, расчет прогрессивной крутизны нарезов при условии постоянства нормальной реакции боевой грани был дан акад. А. Н. Крыловым.

Некоторые же авторы, как например Кайзер, признают нарезку постоянной крутизны более выгодной.

В данное время у большинства систем, имеющихся у нас на вооружении, за исключением гаубиц и коротких пушек, принята постоянная нарезка.

Мелкокалиберное оружие имеет нарезку постоянной крутизны, которая является также единственно возможной и для снарядов с готовыми выступами.

Проф. Н. Ф. Дроздов считает, что, если для ствола орудия предположена прогрессивная нарезка, то „выбор специальной кривой нарезов не играет существенной роли", будет ли это

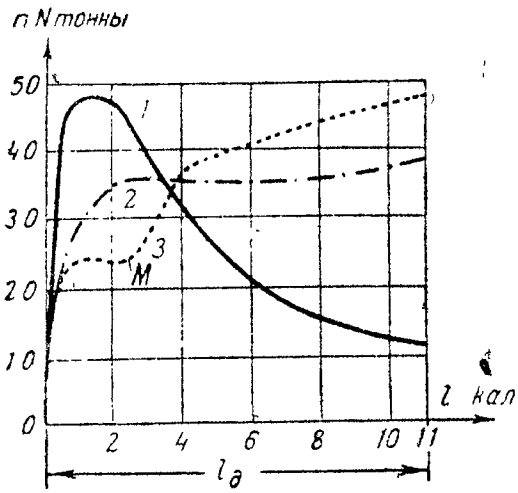


Фиг. 32.

парабола или другая кривая, если между углами $\beta_н$ и $\beta_д$ угол наклона нарезов β „будет расти постоянно и однообразно".

Для определения начального угла наклона нарезов в зависимости от $\beta_д$ Гейденрейх дает формулу следующего вида:

(38) $\beta_н : \beta_д = 2{,}00\,\eta_1 - 2{,}84\,\eta_1^2 + 1{,}84\,\eta_1^3$.



Фиг. 33.

1—нарезка постоянной крутизны $\beta = 7°10'$;
2—нарезка прогрессивной крутизны $\beta_н = 3°36'$; $\beta_д = 7°10'$.
3— нарезка до М постоянной крутизны $\beta = 3°36'$;
нарезка от М переменной крутизны $\beta_д = 7°10'$;

Имеется еще приближенная формула Гейденрейха:

$$\beta_н : \beta_д = 0{,}21 + 0{,}65\,\eta_1,$$

где η_1 — коэфициент производительности артиллерийской системы, равный

$$\eta_1 = \frac{\varphi q v_д^2}{2g\,s l_д\,p_m}.$$

По этим формулам получаем зависимость отношения углов наклона нарезов от характера горения пороха. Для менее прогрессивных порохов $\beta_н$ следует уменьшать.

§ 15. РАБОТА ВЕСА СНАРЯДА И СВЯЗАННОЙ С НИМ СИЛЫ ТРЕНИЯ

Если обозначить коэфициент трения снаряда о стенки канала ствола ν_1, то рассматриваемую работу при некотором угле возвышения φ_0 можно определить по формуле:

(39) $$A_{сн} = q\,(\sin\varphi_0 + \nu_1 \cos\varphi_0)\,l_д,$$

при $\varphi_0 = 0$

$$A_{сн} = \nu_1 q l_д.$$

Если же учесть и работу, затрачиваемую на подъем некоторой части заряда $\Theta\omega$, то следовало бы изменить формулу (39) для $A_{сн}$ следующим образом:

$$A_{сн} = [(q + \Theta\omega)\sin\varphi_0 + q\nu_1 \cos\varphi_0]\,l_д.$$

Работа эта, вообще говоря, очень мала по сравнению с дульной энергией снаряда, составляя сотые и тысячные доли процента, вследствие чего в расчетах она не учитывается.

Задача 21—22. Вычисление работы веса снаряда и связанной с ним силы трения

21) 76,2-*мм* зенитная пушка.

Исходные данные (те же, что и 76,2-*мм* пушки образца 1902 г.)

Угол возвышения берем $\varphi_0 = 17°$ и $\varphi_0 = 75°$.

φ_0		17°	75°
	$\lg \nu_1$	$\bar{1},2455$	$\bar{1},2455$
(+)	$\lg q$	0,8162	0,8162
	$\lg \cos \varphi_0$	$\bar{1},9806$	$\bar{1},4130$
	$\lg q\nu_1 \cos \varphi_0$	0,0423	$\bar{1},4747$
	$\lg \sin \varphi_0$	$\bar{1},4559$	$\bar{1},9849$
(+)	$\lg (q + \Theta\omega)$	0,8353	0,8353
	$\lg (q + \Theta\omega) \sin \varphi_0$	0,3012	0,8202
	$(q + \Theta\omega) \sin \varphi_0$	2,001	6,610
(+)	$q\nu_1 \cos \varphi_0$	1,103	0,298
	$[(q + \Theta\omega) \sin \varphi_0 + q\nu_1 \cos \varphi_0]$	3,104	6,908
	$\lg [(q + \Theta\omega) \sin \varphi_0 + q\nu_1 \cos \varphi_0]$	0,4920	0,8393
(+)	$\lg l_д$	1,2657	1,2657
	$\lg A_{сн}$	1,7577	2,1050
	$A_{сн}$	57,24	127,4

Вычисление по последней формуле дает следующий результат:

при $\varphi_0 = 17°$,

$A_{сн} = 57{,}2$ *кгдм*,

$\frac{A_{сн}}{A_1} = 0{,}000049 = 0{,}005\%$;

при $\varphi_0 = 75°$,

$A_{сн} = 127$ *кгдм*,

$\frac{A_{сн}}{A_1} = 0{,}00011 = 0{,}01\%$

22) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Начальная скорость . . . . . $v_д = 3810$ *дм/сек*.
Вес снаряда . . . . . $q = 41{,}0$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega = 2{,}15$ *кг*.
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 17{,}60$ *дм*.
Значения η, ν_1 и g . . . . . те же, что и раньше.
Угол возвышения . . . . . $\varphi_0 = 40°$.

$$A_{сн}=[(q+\Theta\omega)\sin\varphi_0+\nu_1 q\cos\varphi_0]\,l_д.$$

$$A_{сн}=577{,}5\ кгдм$$

$$\frac{A_{сн}}{A_1}=0{,}00019=0{,}02\%.$$

	$\lg \nu_1$	$\bar{1}{,}2455$
(+)	$\lg q$	1,6128
	$\lg\cos\varphi_0$	$\bar{1}{,}8778$
	$\lg \nu_1 q\cos\varphi_0$	0,7361
	$\lg\sin\varphi_0$	$\bar{1}{,}8169$
(+)	$\lg(q+\Theta\omega)$	1,6203
	$\lg(q+\Theta\omega)\sin\varphi_0$	1,4372
	$(q+\Theta\omega)\sin\varphi_0$	27,36
(+)	$\nu_1 q\cos\varphi_0$	5,446
	$[(q+\Theta\omega)\sin\varphi_0+q\nu_1\cos\varphi_0]$	32,806
	$\lg[(q+\Theta\omega)\sin\varphi_0+q\nu_1\cos\varphi_0]$	1,5160
(+)	$\lg l_д$	1,2455
	$\lg A_{сн}$	2,7615
	$A_{сн}$	577,5

§ 16. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В КАНАЛЕ СТВОЛА

Воздух, находящийся в канале ствола перед снарядом вытесняется движущимся снарядом.

Работу, затрачиваемую на преодоление только атмосферного давления, можно вычислить, исходя из давления воздуха на единицу площади поперечного сечения снаряда $П_в$.

Величина этой работы $A_{атм}$ будет:

(40) $$A_{атм}=\frac{\pi d'^2}{4}П_в l_д,$$

причем она получается пренебрежимо малой.

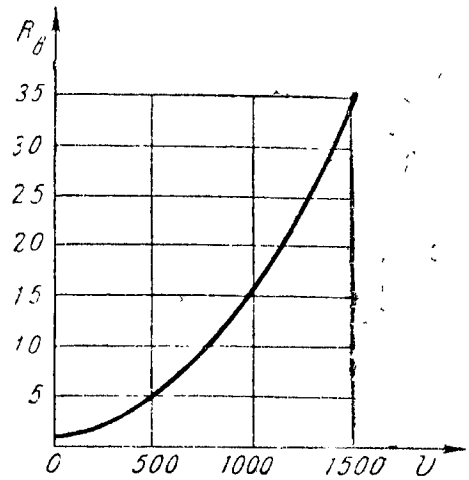
Работа, затрачиваемая на преодоление возрастающего при движении снаряда сопротивления воздуха $A_в$, может быть определена по формуле:

(41) $$A_в=\int_0^{l_д} R_в\,dl,$$

где $R_в$ есть сопротивление воздуха, и может быть вычислена по формулам квадратур, если будет известна зависимость сопротивления воздуха $R_в$ от скорости движения снаряда v.

Однако функция $R_в$ от v в условиях движения снаряда в канале неизвестна, а выражение сопротивления одночленным законом (например, как принимает Бринк: $R_в = R_2 v^2$) при изменении v от нуля до $v_д$ нельзя признать правильным.

Применение же более сложных зависимостей $R_в$ от v, даваемых внешней балистикой, также не даст истинной величины сопротивления, так как условия движения снаряда в канале орудия резко отличаются от условий движения снаряда в воздухе. Таким образом вычисление по этим формулам может дать лишь очень приближенную величину работы, которая, вообще говоря, выражается долями процента от дульной энергии.



Фиг. 34.

Экспериментальные данные показывают, что давление на снаряд очень мало по сравнению с давлением пороховых газов. По данным Гюгоньо, для скоростей от 0 до 1500 *м/сек*; сопротивление воздуха $R_в$ изменяется от 0 до 35 *кг/см*^{2}. Для обычных же скоростей до 1000 *м/сек* эта величина еще меньше: около 18 *кг/см*^{2}.

Графическая зависимость $R_в$ от v представлена на фиг. 34.

Следует учесть еще и то, что в канале ствола всегда возможен прорыв пороховых газов, который несомненно уменьшит величину сопротивления воздуха.

Принимая во внимание все сказанное, ***величиной сопротивления воздуха*** без особой погрешности, независимо от калибра, ***можно пренебречь.***

В случае же учета атмосферного давления при различных вычислениях принимают приближенно, что оно равно 1 *кг/см*^{2}.

ГЛАВА II

ЗАРЯД

§ 17. О ХАРАКТЕРЕ РАСШИРЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

Изучая работы, производимые расширяющимися пороховыми газами, и явления, связанные непосредственно с зарядом—следует сначала определить характер процесса расширения пороховых газов.

Чрезвычайная сложность явления, недостаток экспериментальных данных и аналитические трудности заставляют нас считать, что процесс расширения газов происходит адиабатически, т. е. без теплового обмена между газом и окружающей средой. Эта гипотеза, несмотря на явную приближенность, является наиболее приемлемой и простой.

Но нагревание стенок орудия совершенно очевидно, и, принимая гипотезу адиабатическаго расширения, приходится вводить различные дополнительные поправки.

Напомним, что для всякого адиабатического процесса отношение теплоемкостей при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_w является величиной, характеризующей процесс и называется показателем адиабаты:

$$k = \frac{c_p}{c_w}.$$

Теплоемкость c_w является в свою очередь функцией температуры газов и приближенно выражается следующей зависимостью:

$$c_w = a_{2,i} + b_{1,i} t^2,$$

где a и b — постоянные, связанные с природой газа.

Если в обычных условиях $k=1{,}41$, то в условиях выстрела, когда в канале ствола температура пороховых газов доходит до 2000—3000°, величина k изменяется. Согласно опытам Маляра и ле-Шателье, это изменение идет обратно изменению температур, и при температурах указанного порядка k уменьшается до 1,1.

Для условий процесса расширения в канале ствола вводится некоторая поправка в величину k, которая должна отчасти компенсировать ошибки, происходящие от несоответствия принятой гипотезы с действительностью; также необходимо исправить ряд ошибок, не поддающихся непосредственному учету.

В балистических расчетах величина коэфициента адиабаты k, имеющего особое значение при определении дульной скорости $v_д$, принимается различной и, вообще говоря, приближенной.

Так, у нас обычно принимают в целом ряде решений основной задачи внутренней балистики величину коэфициента θ, связанного с коэфициентом адиабаты зависимостью $\theta = k - 1$, равную 0,20 (проф. Н. Ф. Дроздов, проф. И. П. Граве, В. М. Трофимов и др.).

Некоторые авторы дают для θ другие значения. Шарбонье принимает $\theta=0{,}25$, Шмиц $\theta=0{,}11-0{,}12$.

Майнарди, учитывая, что максимальное давление в канале ствола p_m и дульная скорость $v_д$ отвечают различным моментам положения снаряда в канале, а следовательно, различным температурам пороховых газов, принимает разные значения θ при вычислении p_m и $v_д$. Для вычисления p_m он принимает $\theta_{p_m}=0{,}20$ (для балистита) и для $v_д$ он принимает $\theta_{v_д}=0{,}17$. Если исходить из физического смысла, то $\theta_{v_д}$ должно быть больше θ_{p_m}.

Кранц также принимает различные значения для θ, от $\theta=0{,}11$ и до $\theta=0{,}66$.

Проф. И. П. Граве рекомендует брать для первого пиродинамическаго периода меньшую величину θ, чем для второго пиродинамическаго периода.

Очень интересной и ценной является работа профессора М. Е. Серебрякова по определению зависимости коэфициента θ от температуры пороховых газов, а также понижения температуры газов во время выстрела и определению величины θ по температуре газов при вылете снаряда.

θ и $\theta_{ср}$ в функции от температуры T были вычислены по следующим формулам:

$$\theta = \frac{1}{a + bT},$$

$$\theta_{ср} = \frac{2{,}303(a_1 - a_2)}{b_1} \frac{\lg \frac{a_2 + b_1 T_1}{a_2 + b_1 T}}{T_1 - T},$$

где T_1 есть температура взрывчатого разложения пороха; $\theta_{ср}$ есть величина, характеризующая тепловую энергию, заключенную в газах и выделенную при охлаждении их от температуры T_1 до T; a, a_1, a_2, b и b_1 — коэфициенты для смеси газов, связанные с природой пороховых газов.

Результаты вычислений сведены в табл. 5.

Таблица 5

$\frac{T}{T_1}$	T	θ	$\theta_{ср}$
1,00	2700	0,185	0,185
0,95	2565	0,190	0,188
0,90	2430	0,195	0,190
0,85	2295	0,201	0,193
0,80	2160	0,207	0,196
0,75	2025	0,213	0,199
0,70	1890	0,220	0,202
0,65	1755	0,227	0,205
0,60	1640	0,235	0,208
0,55	1485	0,244	0,212
0,50	1350	0,253	0,215
0,40	1080	0,273	0,223
0,30	810	0,295	0,232
0,20	540	0,323	0,242
0,10	270	0,356	0,252
0	0	0,397	0,265

По этой таблице, если известно отношение $\frac{T_д}{T_1}$, можно определить $\theta_{ср}$ и установить, насколько принимаемая в расчетах величина $\theta = 0{,}20$ пригодна для существующих у нас артиллерийских систем.

Отношение $\frac{T}{T_1}$ определялось проф. М. Е. Серебряковым из уравнения баланса энергии, представленного в следующем виде:

$$\frac{T}{T_1} = 1 - \frac{1}{\psi} \frac{\varphi q v^2}{2gf\omega} \left(\frac{1}{a + \frac{bT_1}{2} + \frac{bT}{2}} \right).$$

Решение этого уравнения, преобразованного в квадратное относительно $\frac{T}{T_1}$, дает интересующую нас величину относительного изменения температуры пороховых газов.

Результаты произведенных таким путем вычислений при $f = 850\,000$ *кгдм/кг* и постоянном составе пороховых газов при движении снаряда для различных орудий приведены в табл. 6.

Таблица 6

Система	7,6-*мм* винтовка	37-*мм* пушка	76/09	76/27	76/02	107/10	152/10	152/30
$\frac{T_д}{T_1}$	0,711	0,729	0,690	0,754	0,688	0,637	0,689	0,700
$\theta_{ср}$	0,2 1	0,2005	0,203	0,199	0,203	0,206	0,203	0,202

Рассмотрение данных таблицы показывает, что $\theta_{ср}$ изменяется в очень малых пределах, от 0,199 до 0,206, при достаточно большом колебании изменения температуры пороховых газов в момент вылета снаряда, от 0,754 до 0,637.

Отсюда также следует, чтобы принимаемая у нас величина θ хорошо совпадает со средним значением $\theta_{ср}=0,202\approx0,20$, полученным достаточно обоснованным путем.

Следует заметить, что в приведенных вычислениях падение температуры от теплоотдачи стенкам орудия не учитывалось.

При учете изменения состава пороховых газов в канале орудия полученные данные существенного изменения не получили.

Итак, обычные решения основной задачи внутренней баллистики при постоянном значении коэфициента адиабаты k соответствуют несколько приближенному решению вопроса при некоторых средних теплоемкостях, а не при действительных теплоемкостях, которые будут изменяться в течение процесса расширения пороховых газов.

§ 18. ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ И ЗАРЯДА

В заснарядном пространстве при движении снаряда продукты горения, а также несгоревшие части заряда двигаются в различных направлениях с большими скоростями.

Вопросы о явлениях в заснарядном пространстве будут освещены несколько позже (см. § 20). Здесь же пока будет рассмотренно только поступательное движение продуктов горения и заряда.

Определение величины работы, затрачиваемой пороховыми газами на поступательное движение продуктов горения и заряда, связано с большими трудностями и возможно лишь при условии ряда упрощений. Положим в основу рассуждений гипотезу Себера, по которой продукты горения и несгоревшая часть заряда, будучи совершено однородными, равномерно заполняют заснарядное пространство; при этом половина заряда двигается вместе со снарядом, а другая половина двигается назад с орудием.

Приняв эту гипотезу, применим к продуктам горения и заряду для определения их живой силы теорему Кенига, по которой живая сила системы материальных точек будет равна

$$A=\frac{\omega v_c^2}{2g}+\sum_{i=1}^{i=n}\frac{\omega_i v_{ri}^2}{2g},$$

где $\frac{\omega}{g}$ — масса системы, v_c — скорость движения центра массы $\frac{\omega_i}{g}$ — массы материальных точек, входящих в систему, и v_{ri} — скорость точек в их относительном движении около центра массы.

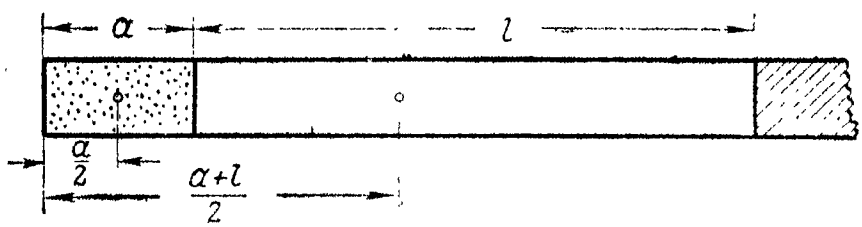
Обозначая

$$A' = \frac{\omega v_c^2}{2g} \quad \text{и} \quad A'' = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\omega_i v_{ri}^2}{2g}, \tag{42}$$

получим:

$$A = A' + A''. \tag{43}$$

До начала движения снаряда однородный заряд будет равномерно заполнять всю камору, длину которой обозначим через a



Фиг. 35.

(фиг. 35). Центр массы заряда будет находиться в середине каморы на расстоянии $\frac{a}{2}$.

В некоторый момент центр массы заряда и продуктов разложения будет находиться в точке $\frac{a+l}{2}$, а следовательно, перемещению снаряда l будет соответствовать перемещение центра массы заряда на $\frac{l}{2}$.

Принимая, что в таком же соотношении будут находиться и скорости, найдем, обозначив скорость центра массы заряда v_c,

$$\frac{v_c}{v} = \frac{1}{2} \text{ или } v_c = \frac{1}{2} v.$$

Подставляя полученную скорость центра массы заряда в первое из уравнений 42, получим для A' следующее выражение:

$$A' = \frac{\omega}{2g} \frac{1}{4} v^2. \tag{44}$$

Далее, перейдем к получению второго слагаемого A''. Рассмотрим элемент заряда толщиной dx, до начала горения находящийся от центра массы заряда на расстоянии x (фиг. 36).

В некоторый момент времени он будет находиться на расстоянии x_l от нового положения центра массы продуктов горения.

Считая, что

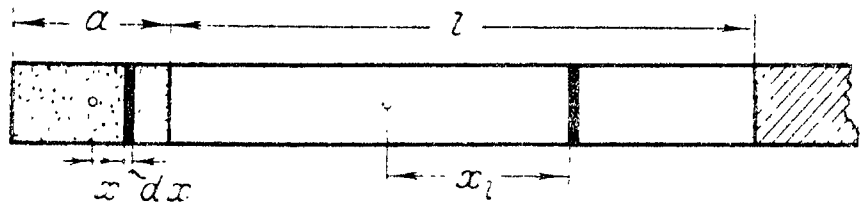
$$\frac{x_l}{x} = \frac{a+l}{a} = 1 + \frac{l}{a}$$

найдем:

$$x_l = x\frac{l}{a} + x,$$

откуда перемещение элемента относительно центра массы будет равно:

$$x_l - x = x\frac{l}{a}.$$



Фиг. 36.

Полагая по предыдущему, что скорости будут находиться в таком же соотношении, будем иметь:

(45) $$\frac{v_{ri}}{v} = \frac{x}{a}$$

или

$$v_{ri} = \frac{x}{a}v.$$

Масса рассматриваемого элемента равна

(46) $$d\left(\frac{\omega}{g}\right) = \delta s\, dx,$$

где δ — средняя массовая плотность заряда.

Тогда живая сила элемента, принимая во внимание полученные выражения для массы и скорости элемента (45, 46), представится следующим образом:

$$d\mathbf{A}'' = \frac{v_{ri}^2}{2} d\left(\frac{\omega}{g}\right) = \frac{\delta s v^2}{2a^2} x^2\, dx.$$

Интегрируя левую часть этого уравнения в пределах от 0 до $\mathbf{A}''$ и правую от $-\frac{a}{2}$ до $+\frac{a}{2}$, найдем выражение живой силы отдельных точек системы:

$$\mathbf{A}'' = \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} \frac{\delta s v^2}{2a^2} x^2\, dx = \frac{2\delta s v^2}{2a^2} \int_0^{\frac{a}{2}} x^2\, dx$$

или

(47) $$\mathbf{A}'' = \frac{\omega}{2g}\frac{1}{12}v^2.$$

Подставляя в уравнение 43 значение слагаемых $\mathbf{A}'$ и $\mathbf{A}''$, получим:

$$\mathbf{A}=\mathbf{A}'+\mathbf{A}''=\frac{\omega}{2g}\frac{1}{4}v^2+\frac{\omega}{2g}\frac{1}{12}v^2$$

или, после очевидного преобразования,

$$\mathbf{A}=\frac{\omega}{2g}\frac{1}{3}v^2=\frac{qv^2}{2g}\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}. \tag{48}$$

При выводе мы приняли равномерное распределение заряда. В случае неравномерного распределения заряда коэфициент $\frac{1}{3}$, входящий в полученную формулу, меняет свое значение.

По исследованиям инж. Ф. Ф. Лендера в случае, если заряд расположен ближе ко дну канала, коэфициент уменьшается до $\frac{1}{6}$, если же заряд расположен ближе ко дну снаряда, то значение его увеличивается до $\frac{1}{2}$.

Госсо и Лиувилль придают этому коэфициенту значение $\frac{3}{11}$, Сюго принимает его равным $\frac{1}{4}$.

Обозначая работу, затрачиваемую на поступательное движение продуктов горения и заряда, через $\mathbf{A}_4$, а коэфициент, характеризующий распределение заряда в выражении живой силы, через η_1, будем иметь:

$$\mathbf{A}_4=\mathbf{A}_1\eta_1\frac{\omega}{q}. \tag{49}$$

К такому же выводу можно притти, рассуждая следующим образом.

Примем, что в заснарядном пространстве скорости продуктов горения и заряда изменяются по закону прямой.

Тогда, считая скорость продуктов горения и заряда у дна снаряда равной скорости снаряда v, а у дна канала равной нулю, скорость $v_{за}$ в некотором сечении, отстоящем от дна каморы на расстояние x, будет равна:

$$v_{за}=\frac{x}{a+l}v,$$

где $a+l$—длина всего заснарядного пространства в любой момент.

Принимая во внимание попрежнему гипотезу об однородности продуктов разложения и равномерном заполнении всего заснарядного пространства, элементарную массу выразим следующим образом:

$$d\left(\frac{\omega}{g}\right)=\frac{\omega}{g(a+l)}dx.$$

Подставляя полученные выражения для скорости $v_{за_x}$ и элементарной массы $d\left(\frac{\omega}{g}\right)$ в выражение элементарной работы dA_4, получим:

$$dA_4 = \frac{\omega v^2 x^2}{2g(a+l)^3} dx.$$

Отсюда, интегрируя в соответствующих пределах, найдем:

$$A_4 = \frac{\omega v^2}{2g(a+l)^3} \int_0^{a+l} x^2 dx = \frac{\omega v^2 (a+l)^3}{2g(a+l)^3 3} = \frac{1}{3} \frac{\omega v^2}{2g}.$$

Вводя вес снаряда, окончательно будем иметь:

$$A_4 = \frac{qv^2}{2g} \frac{1}{3} \frac{\omega}{q} = A_1 \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}.$$

Таким образом работа эта зависит от относительного ***веса заряда и коэфициента характеризующего распределения заряда в выражении живой силы продуктов горения и заряда.***

Для обычных существующих артиллерийских систем $\frac{\omega}{q}$ меняется примерно от 0,04 до 0,35, и величина работы A_4 будет колебаться в пределах от 1,5 до 12% от основной работы A_1.

В специальных орудиях сверхдальней стрельбы $\frac{\omega}{q}$ доходит до 1,5—2,0, а в некоторых системах, как например в американской 254-*мм* пушке, $\frac{\omega}{q} = 3{,}6$. Если вычислить для этих систем величину A_4 по формуле 47, то эта работа приобретает очень большие значения примерно около 70% и даже более 100% (для американской пушки) от основной работы A_1. Следует иметь в виду, что в таких случаях эта формула безусловно неприменима, так как она была получена при условии равномерного распределения продуктов горения и заряда.

В действительности следует отметить, что несгоревшая часть заряда в виде лент или трубок будет двигаться непосредственно за снарядом и не будет равномерно распределена по каморе.

Живая сила продуктов горения от сгоревшей части $\omega\psi$ будет попрежнему

$$\frac{qv^2}{2} \frac{1}{3} \frac{\omega\psi}{q};$$

что касается живой силы несгоревшей части, то ее можно представить в следующем виде:

$$\frac{\omega v^2}{2g}(1-\psi),$$

откуда, после введения веса снаряда получим:

$$\frac{qv^2}{2g}(1-\psi)\frac{\omega}{q}.$$

Работа $\mathbf{A}_4$ получится, как сумма живых сил сгоревшей и несгоревшей части

$$\mathbf{A}_4=\frac{qv^2}{2g}\left(1-\psi+\frac{1}{3}\psi\right)\frac{\omega}{q}$$

или

$$\mathbf{A}_4=\frac{qv^2}{2g}\left(1-\frac{2}{3}\psi\right)\frac{\omega}{q}.$$

Учитывая изменение ψ в пределах от 0 до 1, получим, что среднее значение $\left(1-\frac{2}{3}\psi\right)$ равно $\frac{2}{3}$.

Таким образом в этом случае работа $\mathbf{A}_4$ будет больше определенной по формуле 49, и если взять среднее между полученными значениями коэфициента η, то будем иметь для $\mathbf{A}_4$:

(50)
$$\mathbf{A}_4=\frac{qv^2}{2g}\,\frac{1}{2}\,\frac{\omega}{q}.$$

Такую же величину для $\eta=\frac{1}{2}$ дают Себер и Гюгоньо, Гейденрейх и Кранц. В исследовании Вуатюрье приводится предельное значение этого коэфициента, равное $\frac{2}{3}$.

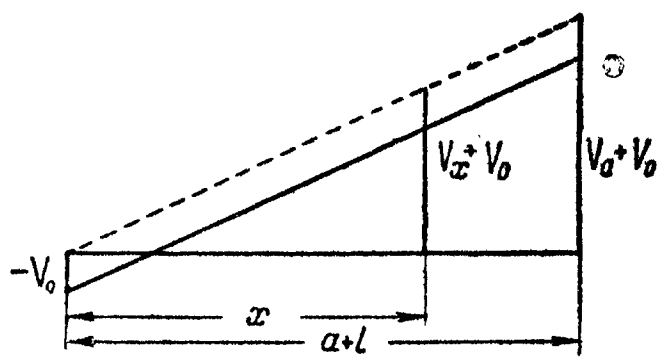
Формулы для $\mathbf{A}_4$ в случае откатывающегося орудия при введении в рассмотрение абсолютного движения продуктов горения и заряда, т. е. движения по отношению к земле, изменяются.

Принимая линейный закон изменения скорости продуктов горения и заряда (фиг. 37) и оставляя те же обозначения, будем иметь:

$$v_{\text{за}_x}+V_0=\frac{x}{(a+l)}(v_a+V_0)$$

или

$$v_{\text{за}_x}=\frac{v_a+V_0}{a+l}\,x-V_0.$$



Фиг. 37.

Учитывая выражение для элементарной массы

$$d\left(\frac{\omega}{g}\right)=\frac{\omega}{2g(a+l)}\,dx,$$

получим элементарную работу $d\mathbf{A}_4$ в следующем виде:

$$d\mathbf{A}_4=\frac{\omega}{2g(a+l)}\left[\frac{v_a+V_0}{a+l}x-V_0\right]^2dx.$$

Интегрируя это уравнение в соответствующих пределах, получим:

$$\mathbf{A}_4=\frac{\omega}{2g(a+l)}\int_0^{a+l}\left(\frac{v_a+V_0}{a+l}\,x-V_0\right)^2dx=\frac{\omega}{2g(a+l)}\int_0^{a+l}\left[\frac{(v_a+V_0)^2x^2}{(a+l)^2}-\right.$$
$$\left.-\frac{2V_0x(v_a+V_0)}{a+l}+V_0^2\right]dx$$

или

$$\mathbf{A}_4 = \frac{\omega}{2g(a+l)}\left[\frac{(v_a+V_0)^2(a+l)}{3} - (v_a+V_0)V_0(a+l) + V_0^2(a+l)\right].$$

После преобразования окончательно будем иметь зависимость, даваемую проф. И. П. Граве:

$$\mathbf{A}_4 = \frac{\omega}{6g}(v_a^2 - v_a V_0 + V_0^2) = \frac{qv_a^2}{2g}\,\frac{1}{3}\left(1 - \frac{V_0}{v_a} + \frac{V_0^2}{v_a^2}\right)\frac{\omega}{q}.$$

Если учитывать отдельно живую силу несгоревшей и сгоревшей части заряда, то для этого случая $\mathbf{A}_4$ выразится как сумма следующего вида:

$$\mathbf{A}_4 = \frac{\omega\psi}{6g}(v_a^2 - v_a V_0 + V_0^2) + \frac{\omega(1+\psi)}{2g}v_a^2,$$

Откуда, после преобразования, получим:

$$\mathbf{A}_4 = \frac{\omega}{6g}(3v_a^2 - 2v_a^2\psi + V_0^2\psi - v_a V\psi)$$

или

$$\mathbf{A}_4 = \frac{qv_a^2}{2g}\,\frac{1}{3}\left[(3-2\psi) - \frac{V_0}{v_a}\left(1 - \frac{V_0}{v_a}\right)\psi\right]\frac{\omega}{q}.$$

Задачи 23—28. **Вычисление работы $\mathbf{A}_4$.**

23) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}00325$ *кг*.
Вес пули . . . . . $q = 0{,}0096$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении для живой силы . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$\mathbf{A}_4 = \mathbf{A}_1\eta\frac{\omega}{q} = 408$ *кгдм* $= 0{,}0408$ *тм*.

$\frac{\mathbf{A}_4}{\mathbf{A}_1} = \frac{408}{362\cdot 10} = 0{,}113 = 11{,}3\%$

	$\lg\omega$	3,5119	$\lg\eta$	$\bar{1}$,5229
(+)	$\operatorname{colg} q$	2,0177	(+) $\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}$,5296
	$\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}$,5296	$\lg \mathbf{A}_1$	3,5586
	$\frac{\omega}{q}$	0,3386	$\lg \mathbf{A}_4$	2,6111
			$\mathbf{A}_4$	408.4

24) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}879$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q = 6{,}550$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении для живой силы . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$A_4 = A_1\eta\frac{\omega}{q} = 517\cdot 10^2\ кгдм =$$

$$= 0{,}517\ тм.$$

$$\frac{A_4}{A_1} = \frac{517\cdot 10^2}{1154\cdot 10^3} = 0{,}0448 = 4{,}48\%.$$

	$\lg\omega$	$\bar{1}{,}9440$	$\lg\eta$	$\bar{1}{,}5229$
(+)	$\operatorname{colg} q$	$\bar{1}{,}1838$	(+) $\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}{,}1278$
	$\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}{,}1278$	$\lg A_1$	6,0625
			$\lg A_4$	4,7132
	$\frac{\omega}{q}$	0,1342	A_4	$5166\cdot 10$

25) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}863$ *кг.*
Вес снаряда . . . . . $q = 22{,}93$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда
в выражении для живой силы . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$A_4 = A_1\eta\frac{\omega}{q} = 165\cdot 10^2\ кгдм =$$

$$= 1{,}65\ тм.$$

$$\frac{A_4}{A_1} = \frac{165\cdot 10^2}{1314\cdot 10^3} = 0{,}0126 = 1{,}26\%$$

	$\lg\omega$	$\bar{1}{,}9360$	$\lg\eta$	$\bar{1}{,}5229$
(+)	$\operatorname{colg} q$	$\bar{2}{,}6396$	(+) $\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{2}{,}5756$
	$\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{2}{,}5756$	$\lg A_1$	6,1185
			$\lg A_4$	4,2170
	$\frac{\omega}{q}$	0,0376	A_4	$1648\cdot 10$

26) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 127{,}9$ *кг.*
Вес снаряда . . . . . $q = 385{,}9$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда
в выражении живой силы . . . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$A_4 = A_1\eta\frac{\omega}{q} = 176\cdot 10^5\ кгдм =$$

$$= 176\cdot 10\ тм$$

$$\frac{A_4}{A_1} = \frac{176\cdot 10^5}{1571\cdot 10^5} = 0{,}112 = 11{,}2\%$$

	$\lg\omega$	2,1069	$\lg\eta$	$\bar{1}{,}5229$
(+)	$\operatorname{colg} q$	$\bar{3}{,}4135$	$+\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}{,}5204$
	$\lg\frac{\omega}{q}$	$\bar{1}{,}5204$	$\lg A_1$	8,1964
			$\lg A_4$	7,2397
	$\frac{\omega}{q}$	0,3314	A_4	$1757\cdot 10^4$

27) 21-*см* сверхдальнобойная германская пушка

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega=240{,}0$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q=120{,}0$ *кг*.

Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q}=2{,}0$.

Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta=\frac{1}{3}$.

$$\frac{A_4}{A_1}=\eta\frac{\omega}{q}=\frac{1}{3}\,2{,}0=0{,}666=66{,}6\%.$$

При весе заряда . . . . . $\omega=300$ *кг*.

$$\frac{\omega}{q}=2{,}5.$$

$$\frac{A_4}{A_1}=\eta\frac{\omega}{q}=\frac{1}{3}\,2{,}5=0{,}833=83{,}3\%.$$

28) 254-*мм* сверхдальнобойная американская пушка

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega=653{,}2$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q=181{,}4$ *кг*.

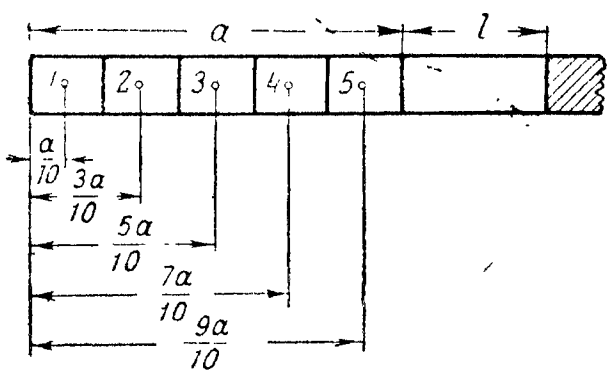
Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q}=3{,}6$.

Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta=\frac{1}{3}$.

$$\frac{A_4}{A_1}=\eta\frac{\omega}{q}=\frac{1}{3}\,3{,}6=1{,}2=120\%.$$

Задача 29. Определение работы, затрачиваемой на поступательное движение заряда, делением заряда на несколько равных частей

При условии равномерного распределения однородного заряда можно простыми, даже элементарными рассуждениями получить выражение работы A_4.



Фиг. 37а.

Разделим заряд на несколько равных частей. Возьмем пять равных частей. Расстояния от центра массы каждой отдельной части заряда до начала каморы указаны на фиг. 37а.

К моменту, когда снаряд прошел путь l, первая часть заряда пройдет путь, равный

$$\frac{a+l}{10}-\frac{a}{10}=\frac{l}{10}.$$

Скорость первой части заряда будет равна:

$$v_{з_1}=\frac{1}{10}v.$$

Вторая часть заряда к этому моменту пройдет путь, равный

$$\frac{3(a+l)}{10}-\frac{3a}{10}=\frac{3}{10}l.$$

Скорость второй части заряда будет равна:

$$v_{з_2}=\frac{3}{10}v.$$

Третья часть заряда пройдет путь, равный:

$$\frac{5(a+l)}{10}-\frac{5a}{10}=\frac{5}{10}l.$$

Скорость третьей части будет равна:

$$v_{з_3}=\frac{5}{10}v.$$

Соответственно четвертая и пятая части заряда пройдут пути, равные

$$\frac{7(a+l)}{10}-\frac{7a}{10}=\frac{7}{10}l,$$

$$\frac{9(a+l)}{10}-\frac{9a}{10}=\frac{9}{10}l.$$

Скорости четвертой и пятой частей будут равны:

$$v_{з_4}=\frac{7}{10}v.$$

$$v_{з_5}=\frac{9}{10}v.$$

Живая сила поступательного движения всего заряда получится, как сумма живых сил отдельных частей заряда:

$$\mathbf{A}_4=\frac{\omega}{5g}\frac{v_{з_1}^2}{2}+\frac{\omega}{5g}\frac{v_{з_2}^2}{2}+\frac{\omega}{5g}\frac{v_{з_3}^2}{2}+\frac{\omega}{5g}\frac{v_{з_4}^2}{2}+\frac{\omega}{5g}\frac{v_{з_5}^2}{2}=$$

$$=\frac{\omega}{5g}\frac{1}{2}\left(\frac{v^2+9v^2+25v^2+49v^2+81v^2}{100}\right)=$$

$$=\frac{\omega}{5g}\frac{1}{2}\frac{165v^2}{100}=\frac{qv^2}{2g}\,0{,}33\,\frac{\omega}{q}.$$

Таким образом, окончательно получаем ранее выведенное выражение работы $\mathbf{A}_4$:

$$\mathbf{A}_4=\frac{qv^2}{2g}\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}.$$

§ 19. ЯВЛЕНИЯ В ЗАСНАРЯДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Более точное определение величины работы пороховых газов, затрачиваемой на поступательное движение продуктов горения и заряда связано с вопросом о некоторых явлениях в заснарядном пространстве.

В заснарядном пространстве, как уже отмечалось, продукты горения и несгоревшие части заряда находятся в движении. Движение это настолько сложно, что даже при наличии целого ряда допущений, дающих лишь отдаленное схематическое представление об этом явлении, получаются очень сложные аналитические зависимости.

Задача эта, известная под названием задачи Лагранжа, недавно схематически решена для некоторых частных случаев. Процесс рассматривается для идеальных газов, при условии мгновенного сгорания заряда, отсутствии трения газов о стенки, при условии движения только по оси цилиндрического канала и без вихревых движений. При этом скорости точек в данном сечении считаются одинаковыми.

На самом деле эти условия далеко не соответствуют действительности, и рассматриваемое явление чрезвычайно усложняется еще некоторыми обстоятельствами.

В предыдущем параграфе скорость движения центра массы продуктов горения и несгоревшей части заряда при условии равномерного их распределения равнялась $\frac{v}{2}$.

В действительности пороховые газы имеют скорости, намного превышающие скорость снаряда. Это может быть подтверждено тем, что в начальные моменты вылета снаряда из канала орудия пороховые газы обгоняют снаряд; вследствие этого в заснарядном пространстве пороховые газы должны двигаться в любых направлениях, в результате чего в различных точках появятся сгущения и разрежения. Несгоревшие же части заряда также будут участвовать в этих движениях и иметь скорости, большие, чем скорость снаряда.

У стенок канала вследствие трения, которое будет значительным при наличии высоких давлений, скорости частиц будут меньше, чем скорости частиц, двигающихся на некотором удалении от стенок.

В начале нарезной части канала, при переходе пороховых газов из каморы, сужение струи пороховых газов вызывает вихревые движения. Эти вихревые движения играют большую роль в износе поверхности канала и будут рассмотрены в гл. III.

У дульного среза также возможно (хотя и маловероятно) сжатие струи пороховых газов и появление вихревых движений.

Наконец, в действительности наблюдается волнообразное движение газов, которое вызывает появление ненормально высоких давлений.

Согласно опытам Вьелля, производившимся в манометрических бомбах с целью выяснения причин ненормально больших давлений при стрельбе, появление анормальных давлений связано главным образом с неравномерным распределением заряда.

Практика показала, что в орудиях появление анормальных давлений связано еще и с малой плотностью заряжания и медленно горящим порохом.

Чем длиннее заснарядное пространство и чем дольше горит заряд, что находится в связи с плотностью заряжания, тем больше вероятность появления анормальных давлений вследствие волнообразных движений пороховых газов.

Неравномерное распределение заряда в орудии вызывает движение пороховых газов в направлении не занятого зарядом пространства.

При встрече с дном снаряда или дном каморы пороховые газы сжимаются, и образуются сгущения, создающие ненормальные повышения давления.

Образовавшиеся волны будут отражаться от дна снаряда, возвращаясь к заряду, который в процессе горения под возросшим давлением увеличит приток газов и тем самым усилит волнообразное движение. Явление будет повторяться, и волна снова встретит дно снаряда, причем несомненно влияние на ход процесса будет оказывать скорость снаряда, с которой будет связано число встреч волны с дном снаряда, а также ослабление волны, идущей от дна снаряда.

Влияние будет также оказывать и скорость распространения волнового движения, находящаяся в зависимости от свойств пороховых газов определенной природы пороха. Вьелль дает для дымных порохов скорость 600—700 *м/сек*, для пироксилиновых 1100—1200 *м/сек*.

Вероятно, в этом процессе передвижения газов будут до некоторой степени участвовать и несгоревшие части заряда.

При нормальных условиях стрельбы некоторыми опытами также обнаружено волнообразное движение в заснарядном пространстве, правда в значительно более слабой степени (опыты Забудского в обработке Индра и В. М. Трофимова).

На фиг. 38 кривые дают представление о периодическом изменении скоростей, а следовательно, и давлений в обычных условиях в зависимости от пути снаряда l для различных зарядов пороха марки СП. Эти кривые ясно показывают неравномерность в величине давления в заснарядном пространстве в каждый момент времени, а также насколько отличаются эти значения от давления, принимаемого одинаковым для всего заснарядного пространства.

Некоторый материал по вопросам волнообразного движения дают опыты Калакуцкого с ружейными стволами. Опыты Калакуцкого производились с целью получения определенных давлений при пробе черновых ружейных стволов.

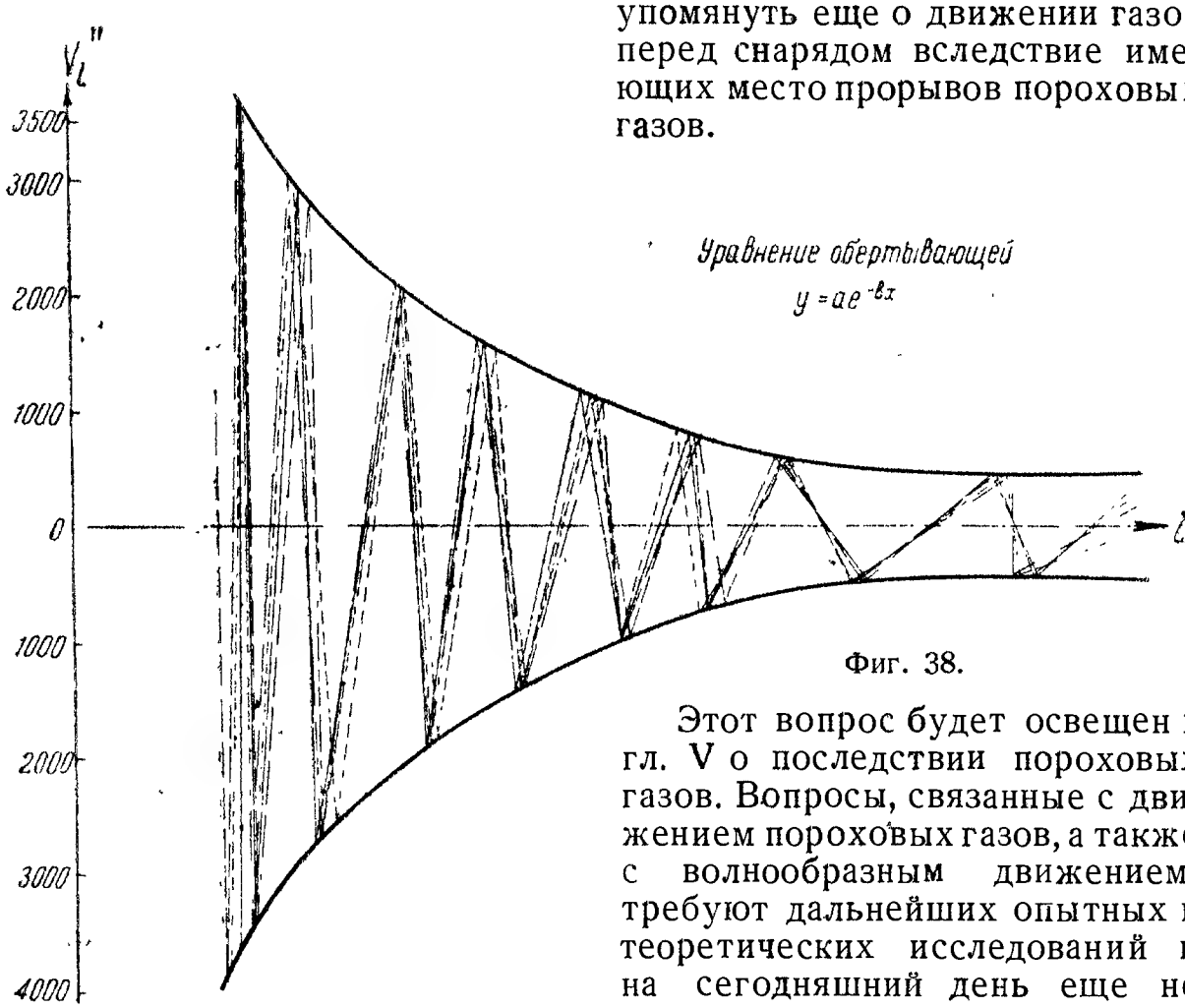
В этих опытах различного веса заряды помещались в стволе таким образом, что получалось свободное пространство между зарядом и пулей или между зарядом и дном канала.

Проф. И. П. Граве на основании опытов Калакуцкого указывает на появление второго максимума давления примерно у дна пули (в начальном положении) в случае наличия свободного пространства между пулей и зарядом, причем этот максимум больше $p_{дн}$, вызываемого отраженной волной.

При наличии же свободного пространства между зарядом и дном канала получается один максимум давления у дна канала. Поток газа двигается к дну канала и потом уже, отразившись, должен встретить дно снаряда.

Графики изменения давлений представлены на фиг. 39, 40, 41, 42.

Следует также отметить несомненное влияние на волнообразное движение пороховых газов и относительного веса заряда $\frac{\omega}{q}$. Говоря о движении пороховых газов, необходимо упомянуть еще о движении газов перед снарядом вследствие имеющих место прорывов пороховых газов.



Фиг. 38.

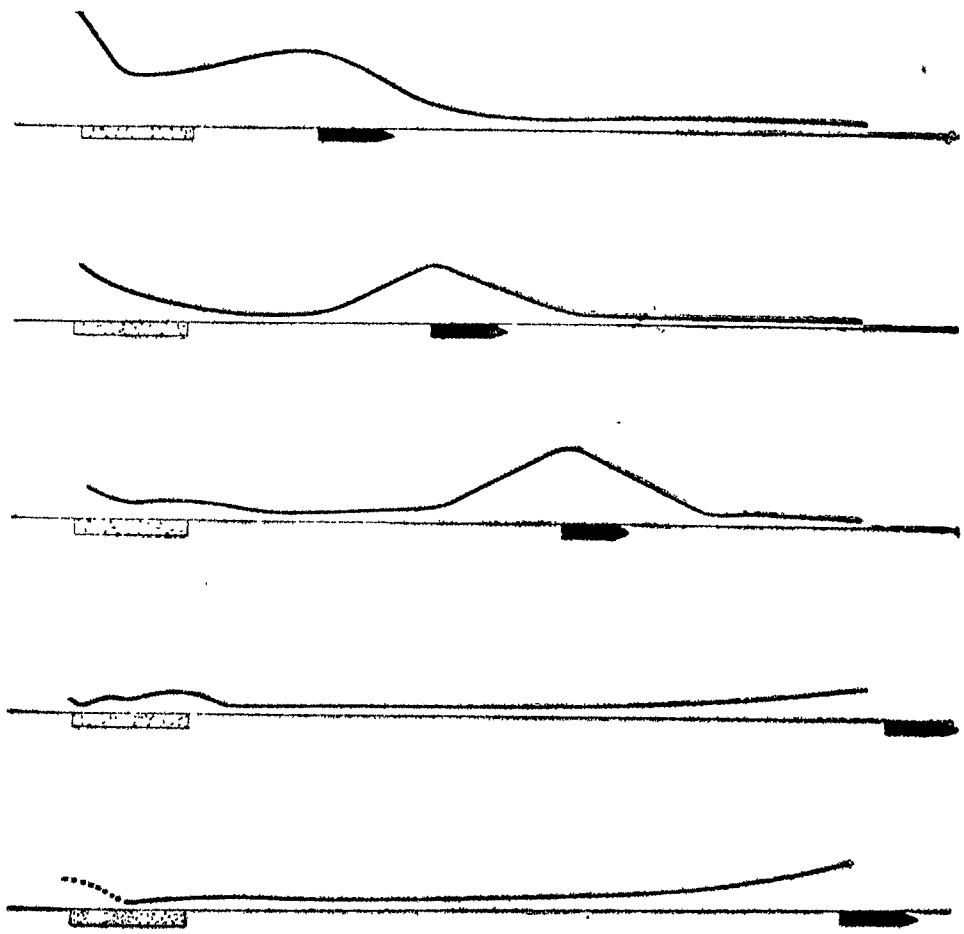
Этот вопрос будет освещен в гл. V о последствии пороховых газов. Вопросы, связанные с движением пороховых газов, а также с волнообразным движением, требуют дальнейших опытных и теоретических исследований и на сегодняшний день еще не решены.

§ 20. О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДАВЛЕНИЙ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ МЕЖДУ ДНОМ СНАРЯДА И ДНОМ КАНАЛА

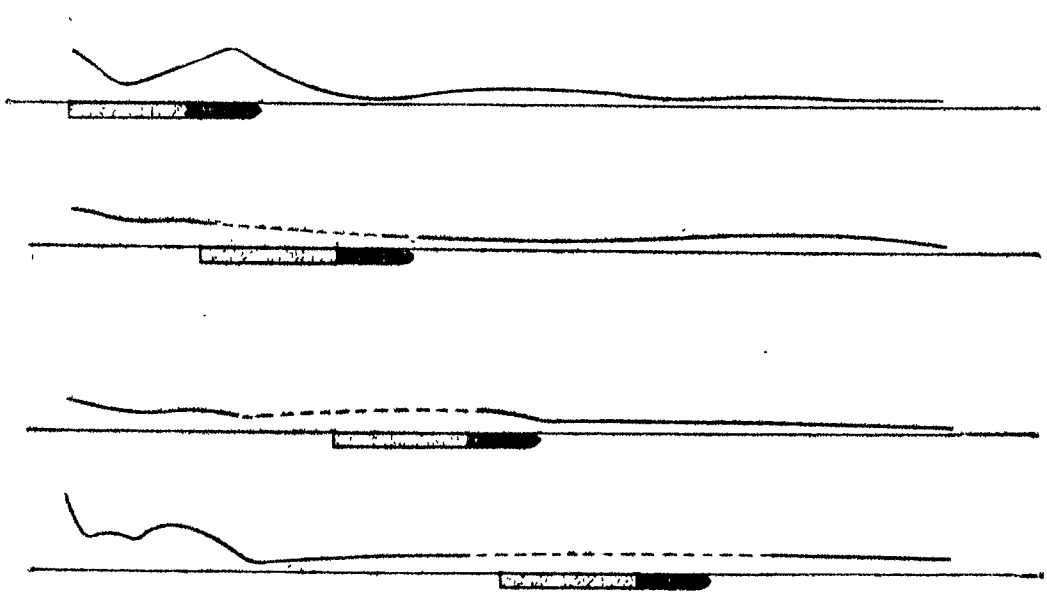
Все расчеты внутренней балистики производятся в предположении, что давление более или менее равномерно распределено по всему заснарядному пространству.

Если же эта равномерность нарушается, то давление p принимается как некоторое среднее давление, одинаковое для всей массы газов.

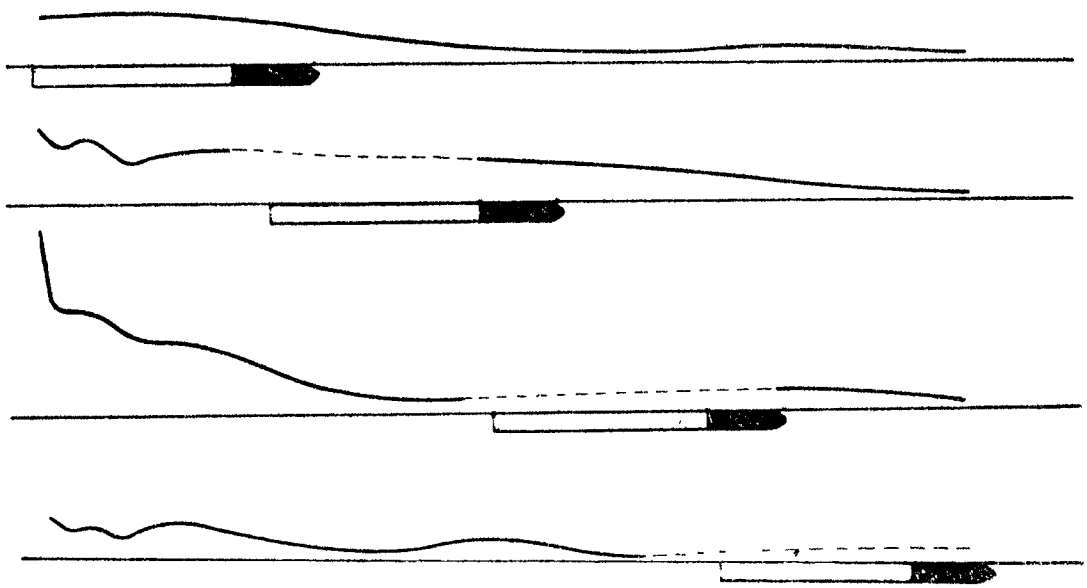
На самом деле, как мы видели в предыдущем параграфе, в заснарядном пространстве вследствие движения продуктов горения отсутствует равенство давлений, и в некоторых случаях



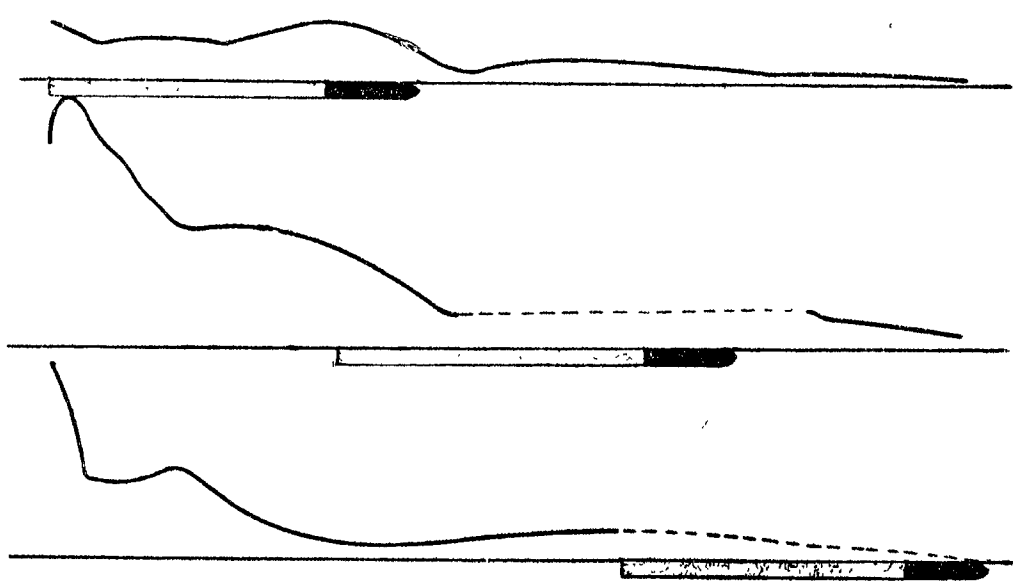
Фиг. 39.



Фиг. 40.



Фиг. 41.



Фиг. 42.

в различных сечениях появляются ненормально высокие давления.

Распределение давлений связано таким образом с движением пороховых газов в заснарядном пространстве; вопрос об этом движении для действительных условий движения в канале ствола орудия решения не имеет вследствие своей исключительной трудности.

Вместе с тем для решения ряда вопросов, связанных с проектированием артиллерийских систем, необходимо знать величину наибольшого давления, а также давление на дно каморы, на дно снаряда и давления в различных сечениях канала.

На основании опытов известно, что *давление на дно канала* $p_{дн}$ *больше давления на дно снаряда* $p_{сн}$.

Это давление на дно канала $p_{дн}$ связано с давлением на дно снаряда $p_{сн}$ классической формулой Сарро:

$$p_{дн}=p_{сн}\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right), \tag{51}$$

где Θ—некоторый коэфициент, называемый коэфициентом Пиобера, меньший единицы и изменяющийся, вообще говоря, при переходе от одного сечения к другому.

В настоящее время обычно Θ берется равным $\frac{1}{2}$ (Пиобер, Себер, Гюгоньо).

Обозначим $\frac{\omega_x}{g}$—массу продуктов горения и заряда между дном снаряда и некоторым сечением x. Внешними силами по отношению к этой массе, движущейся за дном снаряда, будут сила $p_x s$ в рассматриваемом сечении и реакция снаряда, равная силе $p_{сн}s$. Элемент массы обозначим через $d\left(\frac{\omega_x}{g}\right)$, а его ускорение по направлению оси через j_x.

Основное уравнение движения продуктов горения и заряда будет

$$\frac{1}{g}\int_0^{\omega_x} j_x\,d\omega=(p_x-p_{сн})\,s.$$

Вынося j_x средним значением из-под знака интеграла, получим:

$$(p_x-p_{сн})\,s=\frac{1}{g}j_{ср}\omega_x. \tag{52}$$

Обозначая отношение $j_{ср}$ к ускорению снаряда в тот же момент через Θ, найдем:

$$\Theta=\frac{j_{ср}}{\left(\frac{dv}{dt}\right)}=\frac{j_{ср}}{\left(\frac{p_{сн}sg}{q}\right)},$$

откуда

$$j_{ср}=\Theta\frac{p_{сн}sg}{q}.$$

Подставляя таким образом выражение $j_{ср}$ в уравнение 52 для $(p_x-p_{сн})s$, будем иметь:

$$(p_x-p_{сн})s=\frac{1}{g}\Theta\frac{p_{сн}sg}{q}\omega_x.$$

Решая полученное уравнение относительно p_x, найдем:

$$p_x=p_{сн}\left(1+\Theta\frac{\omega_x}{q}\right).$$

Для сечения у дна канала

$$p_x=p_{дн}\ \text{и}\ \omega_x=\omega,$$

и тогда зависимость между давлением на дно канала и дно снаряда получается в следующем виде:

$$p_{дн}=p_{сн}\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right).$$

Эту же формулу, по примеру Себера, можно получить, исходя из закона количеств движения.

Обозначим элемент массы заряда через $d\left(\frac{\omega}{g}\right)$ и скорость этого элемента через $v_{за}$. Если пренебречь внешней силой сопротивления откату, то массы системы ствол—заряд—снаряд будут находиться лишь под действием внутренних сил, и по закону количеств движения будем иметь:

$$\frac{qv_a}{g}-\frac{Q_0}{g}V_0+\frac{1}{g}\int_0^{\omega}v_{за}\,d\omega=0$$

или

$$\frac{Q_0V_0}{g}=\frac{qv_a}{g}+\frac{1}{g}\int_0^{\omega}v_{за}\,d\omega.$$

Вынося средним значением $v_{за}$ из-под знака интеграла, получим:

(53)
$$\frac{Q_0V_0}{g}=\frac{qv_a}{g}+\frac{1}{g}v_{за\,ср}\omega$$

Скорость $v_{\text{за ср}}$ будет заключаться между V_0 и v_a, и если пренебречь величиной V_0 малой по сравнению с v_a, то между 0 и v_a. Иначе говоря,

$$v_{\text{за ср}} = \Theta_a v_a,$$

где Θ_a есть численный коэфициент между 0 и 1.

После подстановки коэфициента Θ_a в уравнение (53) получим:

$$\frac{Q_0 V_0}{g} = (q + \Theta_a \omega) \frac{v}{g}.$$

Диференцируя последнее уравнение по t, найдем:

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dV_0}{dt} = (q + \Theta_a \omega) \frac{1}{g} \frac{dv}{dt}$$

или

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dV_0}{dt} = \left(1 + \Theta_a \frac{\omega}{q}\right) \frac{q}{g} \frac{dv}{dt}.$$

Так как $\frac{Q_0}{g} \frac{dV_0}{dt}$ представляет собой силу отката $p_{\text{дн}} s$, а $\frac{q}{g} \frac{dv}{dt}$ — силу $p_{\text{сн}} s$, то

$$p_{\text{дн}} = p_{\text{сн}} \left(1 + \Theta_a \frac{\omega}{q}\right).$$

Таким образом получена та же зависимость 51, так как Θ_a очень мало отличается от Θ.

Проф. Кранц дает несколько другой вид этой зависимости

$$p_{\text{дн}} = p_{\text{сн}} \frac{1 + \Theta \frac{\omega}{q}}{1 + \Theta_1 \frac{\omega}{Q_0}}, \tag{54}$$

где Θ_1 есть численный коэфициент, также изменяющийся между 0 и 1.

Если принять одинаковую для всего заснарядного пространства среднюю температуру продуктов горения и заряда, то неравномерность давления будет связана с различной плотностью продуктов горения и заряда, зная закон изменения которой, можно будет найти и закон изменения давления.

Ф. Ф. Лендер дал формулу для давления, исходя из зависимости для плотности продуктов горения и заряда:

$$\mu_1 = \frac{\mu}{a + l} F(x, t),$$

где μ_1—плотность заряда в некотором сечении, т. е. масса заряда, приходящаяся на единицу длины канала при условии равномерного его распределения, а μ—масса всего заряда, $a+l$—расстояние между дном канала и дном снаряда в данный момент, x—расстояние между выбранным сечением и дном снаряда и F—некоторая непрерывная функция от x и t, вид которой неизвестен.

Вводя величину $\xi=\frac{x}{a+l}$, характеризующую сечение для простейших случаев задания функции $\varphi(\xi)$, Ф. Ф. Лендером была найдена зависимость между $p_{дн}$ и $p_{сн}$:

$$p_{дн}=\frac{1+\frac{\mu}{m}\int_0^1 \varphi(\xi)(1-\xi)\,d\xi}{1+\frac{\mu}{M}\int_0^1 \varphi(\xi)\,\xi\,d\xi}\,p_{сн},$$

где интегралы в числителе и знаменателе формулы представляют собою коэфициенты, ранее обозначенные через Θ и Θ_1; m и M—масса снаряда и откатных частей. Для простейших, случаев: $\varphi(\xi)=1$ при равномерном распределении заряда, $\varphi(\xi)=2\xi$ при расположении заряда ближе к дну канала и $\varphi(\xi)=2(1-\xi)$ при расположении заряда ближе ко дну снаряда.

Коэфициент Θ в этих случаях принимает соответственно следующие значения:

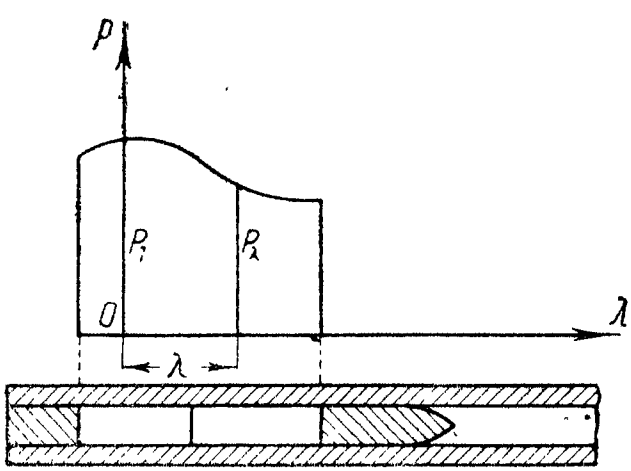
$$\frac{1}{2},\ \frac{1}{3},\ \frac{2}{3}.$$

Из этой же формулы можно получить указанные выше формулы Сарро и проф. Кранца.

Из других формул для закона изменения плотности следует указать на формулу проф. Г. Д. Гродского:

$$p_\lambda=p_1\left(\frac{\lambda}{L}+1\right)e^{-K\lambda},$$

где p_λ и p_1—плотности в некотором сечении с абсциссой λ и в месте первоначального положения дна канала (фиг. 43), где плотность будет наибольшей, L и K—некоторые функции времени.



Фиг. 43.

Исходя из того, что плотность пропорциональна давлению, давление в заснарядном пространстве будет распределяться также по этому закону.

Проф. И. П. Граве в своем курсе внутренней балистики, считая, что полная энергия каждой единицы веса газа в данный момент есть величина, одинаковая для всей массы продуктов горения, дает формулу для давления в следующем виде:

$$p_x^{\frac{n-1}{n}}\,C^{\frac{1}{n}}+\frac{\theta v_x^2}{2g}=f_t, \tag{55}$$

где $n=1+\theta$, C—некоторая постоянная; $f_t=f-\frac{\theta A'}{\omega\varphi}$—величина, характеризующая энергию единицы веса продуктов горения, A'—вся работа без энергии продуктов горения; v_x—скорость продуктов горения в некотором слое.

Последнюю формулу, связывающую давление и скорость пороховых газов в заснарядном пространстве, можно представить и в другом виде:

$$p_x=a(1-bx+hx^2)^{\frac{n}{n-1}}, \tag{56}$$

где

$$a=\left(\frac{f_t-\frac{\theta V_0^2}{2g}}{C^{\frac{1}{n}}}\right)^{\frac{n}{n-1}};$$

$$b=\frac{2\ (v_a+V_0)V_0}{л\left(2gf_t-\theta V_0^2\right)};$$

$$h=\frac{\theta\,(v_a+V_0)^2}{л^2\left(2gf_t-\theta V_0^2\right)};$$

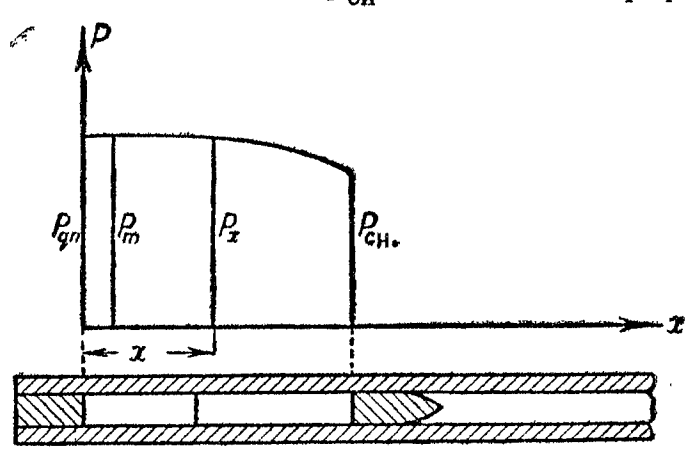
л—длина заснарядного пространства, v_a — скорость снаряда в абсолютном движении.

Для максимального давления получим:

$$(p_x)_m=a\left(1+\frac{b^2}{4h}\right)^{\frac{n}{n-1}};$$

$p_{дн}$ найдется после подстановки $x=0$, а $p_{сн}$—из той же формулы после подстановки $x=л$.

Графически закон распределения давления по формуле (56) для p_x выразится кривой, изображенной на фиг. 44.



Фиг. 44.

Необходимо указать, что ***наибольшее давление*** $(p_x)_m$ в случае линейного закона распределения скоростей в различных сечениях заснарядного пространства будет *всегда приходиться на неподвижной относительно земли вертикальной плоскости.* Сечения же будут различны, находясь на некотором участке канала, длина которого равна длине отката.

Проф. И. П. Граве отмечает, что *разность между* p_m *и* $p_{дн}$ *в обычных условиях будет очень мала* и не больше ошибок, получаемых при вычислении и измерениях давления опытным путем.

Кроме этих формул интересна формула Шарбонье, в которой учитывается влияние каморы и которая отчасти характеризуется отношением сечений каморы и канала:

$$p_{дн}=p_{сн}\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right)\left(\frac{s}{s_1}\right)^x, \tag{57}$$

где s_1—площадь поперечного сечения каморы, а x—некоторый положительный показатель.

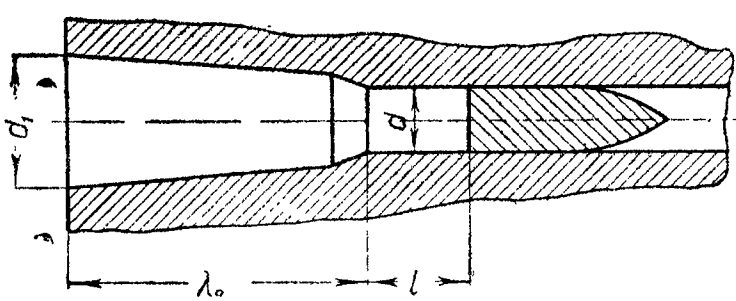
Таким образом по этой формуле $p_{дн}$ получается несколько меньше, и давление получается обратно пропорциональным некоторой степени x отношения площадей поперечного сечения. Разница между $p_{дн}$ и $p_{сн}$ в случае применения камор с большой бутылочностью сильно уменьшается.

Инженер В. Е. Слухоцкий в одной из своих работ показал, что величина показателя степени x в формуле (57) для $p_{сн}$ может быть принята равной 0,6.

Там же мы находим зависимость между давлением $p_г$ у горловины каморы и давлением на дно снаряда:

$$p_г=p_{сн}\left\{1+\frac{1}{2(\lambda_0+l)}\frac{s}{W+sl}[(\lambda_0+l)^2-\lambda_0^2]\frac{\omega}{q}\right\},$$

где W есть объем каморы на участке от дна каморы до горловины (фиг. 45), l есть расстояние от горловины каморы до дна снаряда и λ_0—длина каморы от дна до горловины.



Фиг. 45.

В последнее время вводится в рассмотрение новый фактор, еще более усложняющий задачу о распределении давлений в заснарядном пространстве,—поступательная скорость пороховых газов.

Обычно рассматривалось статическое давление, являющееся функцией природы газа, плотности и температуры. На самом деле величина давления будет зависеть от скорости частиц пороховых газов, а также, вообще говоря, от скорости и формы стенок канала.

Швейкерт дает формулу, учитывающую только влияние молекулярной скорости пороховых газов:

$$p=p_{r_0}\left(1-\frac{v^2}{a^2}\right),$$

где p_{r_0}—давление на дно неподвижного снаряда при равномерном распределении пороховых газов; p—давление на дно движущегося снаряда; v—скорость снаряда; a—составляющая средней скорости молекул газа вдоль оси канала.

Давление p увеличивается с увеличением a, при $v=a$, $p=0$.

В заключение следует указать, что наибольшее усилие, испытываемое дном канала при выстреле, можно найти из уравнения:

$$\frac{Q_0}{g}\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_{\max}=p_{m_{\text{дн}}}s,$$

где $\frac{Q_0}{g}$—масса откатных частей; $p_{m_{\text{дн}}}$ определяется вышеприведенными формулами по величине $p_{m_{\text{сн}}}$.

Задачи 30—34. Вычисление давлений на дно канала $p_{\text{дн}}$

30) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Давление на дно снаряда . . . . . $p_{\text{сн}}=2813\cdot10^2$ *кг/дм²*

Коэфициент распределения заряда в выражении для количества движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.

Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q}=0{,}339$.

$$p_{\text{дн}}=p_{\text{сн}}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)=$$
$$=3291\cdot10^2\ \text{кг/дм}^2.$$

$$\frac{p_{\text{дн}}}{p_{\text{сн}}}=1{,}170=117\%.$$

$\theta\frac{\omega}{q}$	0.1695	$\lg\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0682
$\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	1,1695	(+) $\lg p_{\text{сн}}$	5,4492
		$\lg p_{\text{дн}}$	5,5174
		$p_{\text{дн}}$	$3291\cdot10^2$

31) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Давление на дно снаряда . . . . . $p_{\text{сн}}=2325\cdot10^2$ *кг/дм²*.

Коэфициент распределения заряда в выражении для количества движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.

Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q}=0{,}137$.

$$p_{\text{дн}}=p_{\text{сн}}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)=$$
$$=2480\cdot10^2\ \text{кг/дм}^2.$$

$$\frac{p_{\text{дн}}}{p}=1{,}067=106{,}7\%.$$

$\theta\frac{\omega}{q}$	0,0671	$\lg\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0281
$\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	1,0671	(+) $\lg p_{\text{сн}}$	5,3664
		$\lg p_{\text{дн}}$	5,3945
		$p_{\text{дн}}$	$2480\cdot10^2$

32) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Давление на дно снаряда . . . . . $p_{сн} = 1757 \cdot 10^2$ *кг/дм*^{2}.
Коэфициент распределения заряда в выражении для количества движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.
Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q} = 0{,}038$.

$$p_{дн} = p_{сн}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right) = 1789 \cdot 10^2 \text{ кг/дм}^2.$$

$$\frac{p_{дн}}{p_{сн}} = 1{,}019 = 101{,}9\%$$

$\theta\frac{\omega}{q}$	0,019
$\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	1,019

$\lg\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0081
(+) $\lg p_{сн}$	5,2447
$\lg p_{дн}$	5,2528
$p_{дн}$	$1789 \cdot 10^2$

33) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Давление на дно снаряда . . . . . $p_{сн} = 1757 \cdot 10^2$ *кг/дм*^{2}.
Коэфициент распределения заряда в выражении для количества движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.
Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q} = 0{,}052$.

$$p_{дн} = p_{сн}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right) = 1788 \cdot 10^2 \text{ кг/дм}^2.$$

$$\frac{p_{дн}}{p_{сн}} = 1{,}026 = 102{,}6\%.$$

$\theta\frac{\omega}{q}$	0,026
$\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	1,026

$\lg\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0069
(+) $\lg p_{сн}$	5,2447
$\lg p_{дн}$	5,2516
$p_{дн}$	$7188 \cdot 10^2$

34) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Давление на дно снаряда . . . . . $p_{сн} = 2618 \cdot 10^2$ *кг/дм*^{2}
Коэфициент распределения заряда в выражении для количества движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.
Относительный вес заряда . . . . . $\frac{\omega}{q} = 0{,}331$.

$$p_{дн}=p_{сн}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)=$$
$$=3052\cdot10^2\ кг/дм^2.$$
$$\frac{p_{дн}}{p_{сн}}=1{,}1665=116{,}6\%$$

$\theta\frac{\omega}{q}$	0,1655	$\lg\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0667
$\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	1,1655	(+) $\lg p_{сн}$	5,4179
		$\lg p_{дн}$	5,4846
		$p_{дн}$	$3052\cdot10^2$

Задачи 35—37. **Вычисление наибольшего усилия, передаваемого откатным частям**

35) Испанская винтовка системы Аметральядора.

Исходные данные

Площадь поперечного сечения . . . . . $s=0{,}00385\ дм^2$.
Вес заряда . . . . . $\omega=0{,}00245\ кг$.
Вес пули . . . . . $q=0{,}011\ кг$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.
Давление на дно снаряда . . . . . $p_{m_{сн}}=28\,100\ кг/дм^2$.

Наибольшее усилие вычисляем по уравнению:

$$\frac{Q_0}{g}\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_{max}=$$
$$=p_{m_{дн}}s=$$
$$=p_{m_{сн}}\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)s.$$
$$p_{m_{дн}}s=1196\ кг.$$

$\lg\theta$	$\bar{1}{,}6990$	$g\left(1+\theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0457
(+) $\lg\omega$	$\bar{3}{,}3892$	(+) $\lg p_{m_{сн}}$	5,4487
$\operatorname{colg} q$	1,9586	$\lg s$	$\bar{3}{,}5843$
$\lg\theta\frac{\omega}{q}$	1,0468	$\lg p_{m_{сн}}s$	3,0777
$1+\theta\frac{\omega}{q}$	1,1114	$p_{m_{дн}}s$	1196

36) 76,2-*мм* полевая пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Площадь поперечного сечения . . . . . $s=0{,}4693\ дм^2$.
Вес заряда . . . . . $\omega=0{,}879\ кг$.
Вес снаряда . . . . . $q=6{,}55\ кг$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.
Давление на дно снаряда . . . . . $p_{m_{сн}}=2325\cdot10^2\ кг/дм^2$.

Вычисляем по той же формуле:

$$\frac{Q_0}{g}\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_{max}=$$

$$=p_{m_{дн}}s=$$

$$=p_{m_{сн}}\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right)s.$$

$$p_{m_{дн}}s=1164\cdot10^2\ кг.$$

$\lg\Theta$	$\bar{1},6990$	$\lg\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0281
$(+)\lg\omega$	$\bar{1},9440$	$(+)\lg p_{m_{сн}}$	5,3664
$\operatorname{colg} q$	$\bar{1},18$	$\lg s$	$\bar{1},6715$
$\lg\Theta\frac{\omega}{q}$	$\bar{2},8268$	$\lg p_{m_{дн}}s$	5,0660
$1+\Theta\frac{\omega}{q}$	1,0671	$p_{m_{дн}}s$	$1164\cdot10^2$

37) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Площадь поперечного сечения . . . . . $s=7.456\ дм^2$.
Вес заряда . . . . . $=127,9\ кг$.
Вес снаряда . . . . . $=385,9\ кг$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta=\frac{1}{2}$.
Давление на дно снаряда . . . . . $p_{m_{сн}}=2618\cdot10^2\ кг/дм$.

Вычисляем по той же формуле:

$$\frac{Q_0}{g}\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_{max}=$$

$$=p_{m_{дн}}s=$$

$$=p_{m_{сн}}\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right)s.$$

$$p_{m_{дн}}s=2276\cdot10^3\ кг.$$

$\lg\Theta$	1,6990	$\lg\left(1+\Theta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0667
$(+)\lg\omega$	2,1069	$(+)$	
$\operatorname{colg} q$	$\bar{3},4135$	$\lg p_{m_{сн}}$	5,4179
		$\lg s$	0,8726
$\lg\Theta\frac{\omega}{q}$	$\bar{1},2194$	$\lg p_{m_{дн}}s$	6,3572
$1+\Theta\frac{\omega}{q}$	1,1658	$p_{m_{дн}}s$	$2276\cdot10^3$

§ 21. НЕУЧИТЫВАЕМЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К СГОРАНИЮ ЗАРЯДА В КАНАЛЕ СТВОЛА

Кроме рассмотренных явлений, происходящих в канале ствола огнестрельного оружия, имеется целый ряд явлений, связанных с процессом образования и расширения газов.

Большую часть таких явлений нельзя учесть. Из них следует отметить:

1. *Сжатие струи пороховых газов* при переходе из каморы в канал (а также, быть может, при выходе газов из дула).
2. *Образование вихрей.*
3. *Влияние нарезов* на пороховые газы.
4. *Трение пороховых газов* о стенки канала.

Что касается работы, связанной с трением газов о стенки канала, то обычно она не учитывается, составляя, как указывает

А. Ф. Бринк, всего около 0,5% дульной энергии снаряда (для 10-дюймовой пушки). Вообще же эту работу можно учесть.

А. Ф. Бринк, считая силу трения пропорциональной давлению, рассматривает среднее давление:

$$p_{ср}=\frac{p_{дн}+p_{сн}}{2}=p_{сн}\left(1+\frac{\theta}{2}\frac{\omega}{q}\right).$$

Для силы трения получается следующее выражение:

$$\nu_2\pi d'(l_0+l)p_{сн}\left(1+\frac{\theta}{2}\frac{\omega}{q}\right),$$

где ν_2—коэфициент трения продуктов горения о сталь в канале ствола. Значение этого коэфициента точно неизвестно. А. Ф. Бринк принимает его равным 0,001. При этом значении ν_2, пользуясь своей полуэмпирической формулой для давления, А. Ф. Бринк выражает элементарную работу на трение газов следующим образом:

$$dA=\nu_2\pi d'(l_0+l)p_{сн}\left(1+\frac{\theta}{2}\frac{\omega}{q}\right)\frac{dl}{2}, \tag{58}$$

где $\frac{dl}{2}$ — перемещение центра тяжести заряда при перемещении пороховых газов на dl; l_0 – приведенная длина каморы[1].

Работа на трение после интегрирования последнего уравнения получается настолько незначительной, что ею можно пренебречь.

Проф. И. П. Граве дает несколько иную формулу.

Получая для силы трения выражение

$$\nu_2 p(\pi d'l+\pi d_c l_c),$$

где d_c и l_c—средний диаметр и фактическая длина каморы, работу он выражает в следующем виде:

$$A_{тр}=\nu_2\frac{\pi d'}{2}\left[\int_0^l pl\,dl+\frac{l_0}{s\sqrt{\zeta}}\frac{\varphi q v^2}{2g}\right], \tag{59}$$

где

$$\zeta=\frac{\pi d_c^2}{4s}=\left(\frac{d_c}{d'}\right)^2.$$

Интеграл $\int_0^l pl\,dl$ находится с помощью формул квадратур, и выражение для $A_{гр}$ получается очень сложным.

Приближенно можно написать, если вынести p средним значением из-под знака интеграла:

$$\int_0^l pl\,dl=p_{ср}\frac{l^2}{2}.$$

---

[1] Приведенной длиной каморы l_0 называется длина цилиндра, площадь поперечного сечения которого равна площади поперечного сечения нарезной части канала ствола орудия s, а объем его равен объему каморы W_0.

Тогда

(60) $$A_{тр}=\frac{\nu_2\pi d'}{2}\left(0{,}5l+\frac{1}{\sqrt{\zeta}}l_0\right)p_{ср}l.$$

Величина $A_{тр}$ по этой формуле получается при $\nu_2=0{,}001$ около 5% дульной энергии, и проф. Граве считает, что ее можно будет считать пренебрежимо малой только после выяснения точного значения коэфициента трения ν_2.

5. *Расположение пакетов заряда,* а также перемещение и положение несгоревшей части заряда в пороховых газах.

6. *Прорыв газов* вокруг ведущего пояска.

7. *Действие пороховых газов на снаряд после вылета* его из канала орудия.

8. *Диссоциация продуктов взрывчатого разложения.*

На все эти явления затрачивается часть энергии пороховых газов, которая не учитывается в общей сумме работ, совершаемых пороховыми газами.

Неточность в определении величины всей работы пороховых газов будет зависеть и от несоответствия с действительными условиями тех допущений, которые были приняты при определении поддающихся учету работ.

Отмеченные неточности выправляются с помощью поправочных коэфициентов, определяемых опытными стрельбами на полигоне.

Так же необходимо введение некоторых поправочных коэфициентов вследствие изменения законов пиростатики в условиях действительного горения пороха в канале орудия.

Поправку вносят обычно в величину коэфициента газообразования C, который характеризует газообразующую способность пороха в начальный момент горения и равен

$$C=\frac{S_1}{\Lambda_1}A,$$

где S_1—начальная поверхность горения зерна пороха,
Λ_1—начальный объем зерна,
A —коэфициент скорости горения.

Задача 38. Вычисление работы трения пороховых газов

305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Диаметр канала по нарезам	$d_н = 3{,}09$ *дм*.
Средний диаметр каморы	$d_с = 3{,}15$ *дм*.
Ширина поля нареза	$a = 0{,}04$ *дм*.
„ дна нареза	$b = 0{,}09$ *дм*.
Объем каморы	$W_0 = 196{,}64$ *дм*^{3}.
Площадь поперечного сечения канала	$s = 7{,}456$ *дм*^{2}.
Длина нарезной части канала . . .	$l_д = 131{,}50$ *дм*.
Дульная скорость	$v_д = 8940$ *дм*.
Фиктивная масса снаряда	$\frac{\varphi q}{g} = 1{,}46$ *кг*.

$$\mathbf{A}_{тр}=\nu_2\frac{\pi d'}{2}p_{ср}\left(0{,}5\,l_д+\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}\right)l_д$$

или так как

$$p_{ср}l_д=\frac{\varphi q v_д^2}{2gs},$$

то

$$\mathbf{A}_{тр}=\nu_2\frac{\pi d'}{2s}\left(0{,}5l_д+\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}\right)\frac{\varphi q v_д^2}{2}=B\frac{\varphi q v_д^2}{2},$$

где

$$\zeta=\left(\frac{d_c}{d'}\right)^2,$$

$$d'=\sqrt{\frac{ad^2+bd_н^2}{a+b}},$$

или приближенно

$$d'=\sqrt{\frac{4s}{\pi}}$$

$$l_0=\frac{W_0}{s};\ \nu_2=0{,}001\ \text{(по Бринку)}$$

$$\frac{\mathbf{A}_{тр}}{\mathbf{A}}=B.$$

lg 4	0,6021
(+) lg s	0,8726
colg π	$\overline{1}$,5028
$\lg\left(\frac{4s}{\pi}\right)$	0,9775
lg d'	0,4888
d'	3,082
(+) lg W_0	2,2936
colg s	$\overline{1}$,1274
lg l_0	1,4210
(+) lg d'	0,4884
colg d_c	$\overline{1}$,5017
$\lg\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}$	1,4111
+ lg 0,5	$\overline{1}$,6990
lg $l_д$	2,1189
lg 0,5 $l_д$	1,8179

0,5 $l_д$	65,75
(+) $\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}$	25,77
$\left(0{,}5l_д+\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}\right)$	91,52
$\lg\left(0{,}5l_д+\frac{l_0}{\sqrt{\zeta}}\right)$	1,9615
lg ν_2	$\overline{3}$,0000
lg π	0,4972
(+) lg d'	0,4884
colg 2	$\overline{1}$,6990
colg 5	$\overline{1}$,1274
lg B	$\overline{2}$,7735
B	0,0594

Коэфициент перед $\frac{\varphi q v_д^2}{2}$, обозначенный через B, дает величину этой работы по отношению к полной работе пороховых газов $\mathbf{A}$

$$\frac{\mathbf{A}_{тр}}{\mathbf{A}}=6\%.$$

ГЛАВА III

СТВОЛ

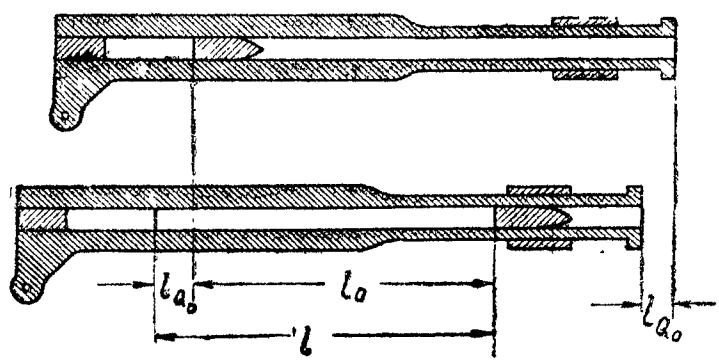
§ 22. АБСОЛЮТНОЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ СНАРЯДА

С момента начала движения снаряда начинается откат орудия. Как известно, для ограничения отката в современных артиллерийских орудиях имеются специальные противооткатные приспособления, состоящие из целого ряда сложных механизмов.

Путь, пройденный снарядом относительно ствола, будет отличаться от пути снаряда по отношению к земле.

Будем считать движение снаряда относительно земли абсолютным движением, а движение относительно ствола относительным.

Обозначим соответственно пути снаряда в абсолютном и относительном движении через l_a и l.



Фиг. 46.

Всегда путь в абсолютном движении будет меньше пути в относительном движении

$$l_a < l.$$

Величина l_a может быть определена, исходя из закона о сохранении движения центра масс.

Если снаряд относительно земли прошел путь l_a, а по отношению к орудию путь его l (см. фиг. 46), то путь ствола относительно земли будет

$$l_{Q_0} = l - l_a.$$

Давление пороховых газов на снаряд и ствол представляет собой внутреннюю силу; внешние же силы будут или пренебрежимо малы (например, сила сопротивления воздуха), или взаимно уравновешиваться (например, сила тяжести и соответствующая ей реакция ствола).

По закону сохранения движения центра масс имеем: если на систему материальных точек не действуют внешние силы, то ее центр массы или движется равномерно и прямолинейно или же остается в покое, или, иначе, внутренние силы не могут изменить скорости центра массы системы.

Если не учитывать внешних сил, то согласно этому закону имеем:

$$ql_a - Q_0 l_{Q_0} = 0,$$

откуда

$$l_a = \frac{Q_0}{q} l_{Q_0} = \frac{Q_0}{q} (l - l_a),$$

или

(61) $$l_a = \frac{Q_0}{Q_0 + q} l = il,$$

где

(62) $$i = \frac{Q_0}{Q_0 + q}.$$

Это уравнение получено без учета движения пороховых газов, массой которых мы пренебрегаем вследствие ее малости по сравнению с массой откатывающихся частей.

Абсолютная скорость движения снаряда на основании полученного выражения для пути снаряда в абсолютном движении будет равна:

(63) $$v_a = \frac{dl_a}{dt} = \frac{Q_0}{Q_0 + q} \frac{dl}{dt} = i \frac{dl}{dt}.$$

§ 23. ОТКАТ СТВОЛА

Откат орудия интересует внутреннюю балистику со стороны работы пороховых газов, затрачиваемой на откат; кроме того, в целом ряде случаев для внутренней балистики должна быть известна скорость ствола орудия. При этом внутренней балистике, изучающей явления в канале ствола, нужна главным образом скорость отката до момента вылета снаряда из канала.

Обозначим работу, затрачиваемую на откат, через $\mathbf{A}_5$. Тогда, при условии свободного отката, можем написать:

(64) $$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0 V_0^2}{2g},$$

где $\frac{Q_0}{g}$ — масса откатных частей, V_0 — скорость отката.

Для определения скорости отката воспользуемся законом сохранения количеств движения системы, по которому: если на систему материальных точек не действуют внешние силы, то ее количество движения по любому направлению есть величина постоянная или, иначе, внутренние силы не могут изменить количества движения системы.

Так как во время выстрела можно не учитывать действия внешних сил и так как до выстрела система находилась в покое, то на основании этого закона будем иметь:

$$\frac{q}{g} v_a - \frac{Q_0}{g} V_0 = 0,$$

или

$$Q_0 V_0 = q v.$$

Учитывая же движение пороховых газов, получим:

$$\frac{q}{g} v_a + \frac{\omega}{g} v_{за} = \frac{Q_0}{g} V_0,$$

или

$$qv_a + \omega v_{за} = Q_0 V_0.$$

Подставляя в это уравнение значения абсолютных скоростей снаряда и заряда v_a и $v_{за}$, найдем

$$q(v - V_0) + \omega(v_з - V_0) = Q_0 V_0.$$

После преобразований имеем:

$$(q + \Theta\omega)v = (Q_0 + q + \omega)V_0,$$

откуда скорость отката V_0 будет равна:

$$V_0 = \frac{q + \Theta\omega}{Q_0 + q + \omega} v = \frac{q}{Q_0} \frac{1 + \Theta\frac{\omega}{q}}{1 + \frac{q}{Q_0} + \frac{\omega}{Q_0}} v.$$

Или, пренебрегая малой величиной ω и $\frac{\omega}{Q_0}$, будем иметь:

(65)
$$V_0 = \frac{q + \Theta\omega}{Q_0 + q} v = \frac{q}{Q_0} \frac{1 + \Theta\frac{\omega}{q}}{1 + \frac{q}{Q_0}} v.$$

Полученное значение для V_0 подставляем в выражение (64) для $\mathbf{A}_5$. Тогда работа, затрачиваемая на движение откатных частей, представится в следующем виде:

$$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0}{2g} \frac{q^2}{Q_0^2} \frac{\left(1 + \Theta\frac{\omega}{q}\right)^2}{\left(1 + \frac{q}{Q_0}\right)^2} v^2 = \frac{qv^2}{2g} \frac{q}{Q_0} \frac{\left[1 + 2\Theta\frac{\omega}{q} + \left(\Theta\frac{\omega}{q}\right)^2\right]}{\left[1 + 2\frac{q}{Q_0} + \left(\frac{q}{Q_0}\right)^2\right]}.$$

Отбрасывая вследствие малости члены $\left(\Theta\frac{\omega}{q}\right)^2$ и $\left(\frac{q}{Q_0}\right)^2$, получим следующую зависимость:

(66)
$$\mathbf{A}_5 = \mathbf{A}_1 \frac{q}{Q_0} \frac{1 + 2\Theta\frac{\omega}{q}}{1 + 2\frac{q}{Q_0}} = \mathbf{A} \frac{q + 2\Theta\omega}{Q_0 + 2q}.$$

Поскольку величина $2\frac{q}{Q_0}$ является достаточно малой по сравнению с единицей, можем написать еще более простую и удобную формулу:

(67)
$$\mathbf{A}_5 = \mathbf{A}_1 \frac{q}{Q_0}\left(1 + 2\Theta\frac{\omega}{q}\right) = \mathbf{A}_1 \frac{q + 2\Theta\omega}{Q_0}.$$

Если принять для скорости движения продуктов горения и заряда линейную зависимость, то в сечении, удаленном от дна канала на x (фиг. 37) скорость продуктов горения и заряда будет:

$$v_{за_x} = (v_a + V_0)\frac{x}{a + l} - V_0,$$

где v_a и $v_{за_x}$ по предыдущему абсолютные скорости снаряда и заряда, $a + l$—длина заснарядного пространства.

По закону сохранения количеств движения сумма количеств движения элементов системы для любого момента равна нулю.

Для случая равномерного распределения продуктов горения и заряда будем иметь:

$$-\frac{Q_0}{g}V_0+\frac{q}{g}v_a+\int_0^{\omega}v_{\text{за}_x}d\left(\frac{\omega}{g}\right)=0$$

или, умножив это уравнение на g, найдем:

$$qv_a+\int_0^{\omega}v_{\text{за}_x}\,d\omega=Q_0V_0. \tag{68}$$

Принимая в первом приближении, что скорости частиц продуктов горения и заряда изменяются от 0 до v_a (на самом деле частицы, соприкасающиеся с дном канала, будут иметь скорость не нуль, а V_0), вынесем на основании теоремы о средних $v_{\text{за}_x}$ средним значением за знак интеграла; тогда

$$\int_0^{\omega}v_{\text{за}_x}\,d\omega=v_{\text{за}_{\text{ср}}}\omega.$$

Так как

$$x_{\text{ср}}=\frac{a+l}{2},$$

то средняя скорость $v_{\text{за}_{\text{ср}}}$ будет равна:

$$v_{\text{за}_{\text{ср}}}=\left[(v_a+V_0)\frac{x_{\text{ср}}}{a+l}-V_0\right]=(v_a+V)\frac{1}{2}-V_0=\frac{v_a-V_0}{2}.$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (68) получим:

$$qv_a+\frac{v_a-V_0}{2}\omega=Q_0V_0,$$

откуда находим выражение для скорости отката V_0:

$$V_0=\frac{q+\frac{1}{2}\omega}{Q_0+\frac{1}{2}\omega}v_a=\frac{q}{Q_0}\frac{1+\frac{1}{2}\frac{\omega}{q}}{1+\frac{1}{2}\frac{\omega}{Q_0}}v_a. \tag{69}$$

Подставляя последнюю формулу в уравнение (64), получим другую зависимость для работы $\mathbf{A}_5$:

$$\mathbf{A}_5=\frac{Q_0V_0^2}{2g}=\frac{Q_0}{2g}\frac{\left(q+\frac{1}{2}\omega\right)^2}{\left(Q_0+\frac{1}{2}\omega\right)^2}v_a^2. \tag{70}$$

Пренебрегая в последней формуле $\frac{1}{2}\omega$ по сравнению с Q_0, получим

$$\mathbf{A}_5=\frac{Q_0}{2g}\frac{\left(q+\frac{1}{2}\omega\right)^2}{Q_0^2}v_a^2 \tag{71}$$

Вводя в уравнение (69) относительную скорость движения снаряда, найдем

$$V_0 = \frac{q + \frac{1}{2}\omega}{Q_0 + \frac{1}{2}\omega}(v - V_0)$$

или, после преобразований, получим формулу (65)

$$V_0 = \frac{q + \theta\omega}{Q_0 + q} v = \frac{q}{Q_0} \frac{1 + \theta\frac{\omega}{q}}{1 + \frac{q}{Q_0}} v.$$

Подставляя относительную скорость в уравнение (70), найдем

$$A_5 = \frac{Q_0}{2g} \frac{\left(q + \frac{1}{2}\omega\right)^2}{(Q_0 + q)^2} v^2$$

или

$$A_5 = A_1 \frac{q}{Q_0} \frac{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{\omega}{q}\right)^2}{\left(1 + \frac{q}{Q_0}\right)^2}. \tag{72}$$

Отбрасывая малые величины, получим и здесь ранее приведенную формулу (66).

Следует помнить, что полученные выражения (65) и (69) дают величину скорости отката, которая имеет место лишь до момента вылета снаряда, причем, так как сопротивление откату в период нахождения снаряда в канале ствола очень мало, то скорости, полученные по этим формулам в предположении свободного отката, близки к действительным скоростям и не могут быть применимы только тогда, когда имеются дульные тормоза.

Скорость при свободном откате отлична от той максимальной скорости отката, которую приобретают откатные части под продолжающимся действием пороховых газов после вылета снаряда и которая равна:

$$V_{0_{max}} = \frac{q + \beta\omega}{Q_0} v_д, \tag{73}$$

где β для наших систем, по данным инж. В. Е. Слухоцкого, изменяется от 1,8 до 8,7.

Величина исследованной работы A_5 колеблется для обычных полевых артиллерийских систем от 1,25 до 1,5% для пушек и от 3,0 до 4,0% для гаубиц.

Следует в заключение заметить, что импульс, получаемый откатными частями при условии свободного отката, может быть вычислен по формуле:

$$J = \frac{Q_0}{g} V_0 = \frac{q + \theta\omega}{g} v_д.$$

Максимальная величина импульса за все время действия пороховых газов в канале ствола орудия будет равна:

$$J_{\max}=\frac{Q_0}{g}V_{0\max}=\frac{q+\beta\omega}{g}v_д.$$

Имея значение для $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_4$ и $\mathbf{A}_5$, можно определить живую силу снаряда, заряда и ствола орудия:

$$\mathbf{A}_{1,4,5}=\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_4+\mathbf{A}_5=\mathbf{A}_1\left(1+\eta_1\frac{\omega}{q}+\frac{q+2\theta\omega}{Q_0}\right)$$

или, вводя обозначение

$$\varphi_{1,4,5}=1+\eta_1\frac{\omega}{q}+\frac{q+2\theta\omega}{Q_0}=1+\frac{q}{Q_0}+\frac{\omega}{q}\left(\eta_1+2\theta\frac{q}{Q_0}\right),$$

получим:

$$\mathbf{A}_{1,4,5}=\varphi_{1,4,5}\mathbf{A}_1.$$

Задачи 39—42. Вычисление работы $\mathbf{A}_5$

39) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Вес пули . . . . . $q=0{,}0096$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega=0{,}00325$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0=4{,}00$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.

$$\mathbf{A}_5=\mathbf{A}_1\frac{q+2\theta\omega}{Q_0}=$$
$$=\mathbf{A}_1\frac{q+\omega}{Q_0}=$$
$$=12{,}8\ кгдм=$$
$$=0{,}0013\ тм.$$
$$\frac{\mathbf{A}_5}{\mathbf{A}_1}=\frac{12{,}8}{362\cdot10}=$$
$$=0{,}0035=0{,}35\%.$$

	q	0,0096	$\lg(q+\omega)$	$\bar{2}.1072$
(+)			(+) $\operatorname{colg} Q_0$	$\bar{1}{,}3979$
	ω	0,0032	$\lg \mathbf{A}_1$	3,5586
	$q+\omega$	0,0128	$\lg \mathbf{A}_5$	1,0637
			$\mathbf{A}_5$	12,77

40) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . $q=6{,}550$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega=0{,}879$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0=470{,}0$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta=\frac{1}{2}$.

$$\mathbf{A}_5=\mathbf{A}_1\frac{q+2\theta\omega}{Q_0}=$$
$$=\mathbf{A}_1\frac{q+\omega}{Q_0}=$$
$$=1825\cdot10\ кгдм=$$
$$=1{,}825\ тм.$$
$$\frac{\mathbf{A}_5}{\mathbf{A}_1}=\frac{1825\cdot10}{1154\cdot10^3}=$$
$$=0{,}0158=1{,}58\%.$$

	q	6,550	$\lg(q+\omega)$	0,8709
(+)			(+) $\operatorname{colg} Q_0$	$\bar{3}{,}3279$
	ω	0,879	$\lg \mathbf{A}_1$	6,0625
	$q+\omega$	7,429	$\lg \mathbf{A}_5$	4,2613
			$\mathbf{A}_5$	$1825\cdot10$

41) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . $q = 22{,}93$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}863$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 550{,}0$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.

$$A_5 = A_1 \frac{q + 2\theta\omega}{Q_0} = A_1 \frac{q + \omega}{Q_0} =$$
$$= 5680 \cdot 10 \text{ кгдм} = 5{,}68 \text{ тм}.$$

	q	22 93	$\lg (q + \omega)$	1,3764
(+)			(+) colg Q_0	$\overline{3}$,2595
	ω	0,86	$\lg A_1$	6,1185
	$q + \omega$	23,79	$\lg A_5$	4,7544
			A_5	5680 10

$$\frac{A_5}{A_1} = \frac{5680 \cdot 10}{1314 \cdot 10^3} = 0{,}0432 = 4{,}32\%.$$

42) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Вес снаряда . . . . . $q = 385{,}9$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega = 127{,}9$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 53\,000$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.

$$A_5 = A_1 \frac{q + 2\theta\omega}{Q_0} = A_1 \frac{q + \omega}{Q_0} =$$
$$= 1524 \cdot 10^3 \text{ кгдм} = 152{,}4 \text{ тм}.$$

	q	385,9	$\lg (q + \omega)$	2,7108
(+)			(+) colg Q_0	$\overline{5}$,2757
	ω	127,9	$\lg A_1$	8,1964
	$q + \omega$	513,8	$\lg A_5$	6,1829
			A_5	$1524 \cdot 10^3$

$$\frac{A_5}{A_1} = \frac{1524 \cdot 10^3}{1571 \cdot 10^5} = 0{,}00968 = 0{,}97\%.$$

Задачи 43—47. **Вычисление скорости свободного отката $V_{од}$, отвечающей моменту вылета снаряда**

43) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Дульная скорость . . . . . $v_д = 8600$ *дм/сек*.
Вес снаряда . . . . . $q = 0{,}0096$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}00325$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 4{,}00$ *кг*.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.

$$V_{0д}=\frac{(q+\Theta\omega)\,v_д}{Q_0+q}=$$

$=24{,}0$ *дм/сек.*

	q	0,0096	$\lg(q+\Theta\omega)$	$\bar{2}{,}0492$
	(+)		(+) $\lg v_д$	3,9345
	$\Theta\omega$	0,0016	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$	$\bar{1}{,}3969$
	$(q+\Theta\omega)$	0,0112	$\lg V_{0д}$	1,3806
	(Q_0+q)	4,010	$V_{0д}$	24,02

44) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Дульная скорость . . . . . $v_д = 5882$ *дм/сек.*
Вес снаряда . . . . . $q = 6{,}55$ *кг.*
Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}879$ *кг.*
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 470$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta = \frac{1}{2}$.

$$V_{0д}=\frac{(q+\Theta\omega)\,v_д}{Q_0+q}=$$

$=86{,}3$ *дм/сек.*

	q	6,55	$\lg(q+\Theta\omega)$	0,8445
	(+)		(+) $\lg v_д$	3,7695
	$\Theta\omega$	0,44	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$	$\bar{3}{,}3219$
	$(q+\Theta\omega)$	6,99	$\lg V_{0д}$	1,9359
	(Q_0+q)	476,6	$V_{0д}$	86,28

45) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Дульная скорость . . . . . $v_д = 3353$ *дм/сек.*
Вес снаряда . . . . . $q = 22{,}93$ *кг.*
Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}863$ *кг.*
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 550$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta = \frac{1}{2}$.

$$V_{0д}=\frac{(q+\Theta\omega)\,v_д}{Q_0+q}=$$

$=137$ *дм/сек.*

	q	22,93	$\lg(q+\Theta\omega)$	1,3685
	(+)		(+) $\lg v_д$	3,5254
	$\Theta\omega$	0,43	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$	$\bar{3}{,}2419$
	$(q+\Theta\omega)$	23,36	$\lg V_{0д}$	2,1358
	(Q_0+q)	572,9	$V_{0д}$	136,8

46) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Дульная скорость . . . . . $v_д = 3810$ *дм/сек.*
Вес снаряда . . . . . $q = 41{,}00$ *кг.*
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 1435$ *кг.*
Вес заряда . . . . . $\omega = 2{,}15$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta = \frac{1}{2}$.

$$V_{0_д}=\frac{(q+\Theta\omega)\,v_д}{Q_0+q}=$$

$=107$ *дм/сек.*

	q	41,00	$\lg(q+\Theta\omega)$ 1,6240
(+)			(+) $\lg v_д$ 3,5809
	$\Theta\omega$	1,08	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$ $\overline{4},8310$
	$(q+\Theta\omega)$	42,08	$\lg V_{0_д}$ 2,0359
	(Q_0+q)	1476,0	$V_{0_д}$ 108,6

47) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Дульная скорость . . . . . $v_д = 8940$ *дм/сек.*
Вес снаряда . . . . . $q = 385{,}9$ *кг.*
Вес заряда . . . . . $\omega = 127{,}9$ *кг.*
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 53\,000$ *кг.*
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta = \frac{1}{2}$.

$$V_{0_д}=\frac{(q+\Theta\omega)\,v_д}{Q_0+q}=$$

$=75{,}3$ *дм/сек.*

	q	385,9	$\lg(q+\Theta\omega)$ 2,6531
(+)			(+) $\lg v_д$ 3,9513
	$\Theta\omega$	64,0	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$ $\overline{5},2726$
	$(q+\Theta\omega)$	449,9	$\lg V_{0_д}$ 1,8770
	(Q_0+q)	53390	$V_{0_д}$ 75,34

Задачи 48—52. **Вычисление длины свободного отката l_{Q_0}, отвечающей моменту вылета снаряда.**

48) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 4{,}00$ *кг.*
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 6{,}83$ *дм*
Вес пули . . . . . $q = 0{,}0096$ *кг.*
Вес винтовки и пули . . . . . $Q_0+q = 4{,}01$ *кг.*

$$l_a=\frac{Q_0}{Q_0+q}\,l_д,$$

$$l_{Q_0}=l_д-l_a=l_д-\frac{Q_0}{Q_0+q}\,l_д=$$

$$=l_д\,\frac{q}{Q_0+q},$$

$l_{Q_0}=0{,}02$ *дм.*

	$\lg l_д$	0,8344
(+)	$\lg q$	$\overline{3},9823$
	$\operatorname{colg}(Q_0+q)$	$\overline{1},3969$
	$\lg l_{Q_0}$	$\overline{2},2136$
	l_{Q_0}	0,0164

49) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 470{,}0$ *кг.*
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 18{,}44$ *дм.*
Вес снаряда . . . . . $q = 6{,}55$ *кг.*
Вес откатных частей и снаряда . . $Q_0+q = 476{,}6$ *кг.*

$$l_a = \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д,$$

$$l_{Q_0} = l_д - l_a = l_д - \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д =$$

$$= l_д \frac{q}{Q_0 + q},$$

$l_{Q_0} = 0{,}25$ *дм.*

	$\lg l_д$	1,2657
(+)	$\lg q$	0,8162
	$\operatorname{colg}(Q_0 + q)$	$\bar{3}$,3219
	$\lg l_{Q_0}$	$\bar{1}$,4038
	l_{Q_0}	0,2534

50) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 550{,}0$ *кг.*
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 12{,}65$ *дм.*
Вес снаряда . . . . . $q = 22{,}93$ *кг.*
Вес откатных частей и снаряда . . $Q_0 + q = 572{,}9$ *кг.*

$$l_a = \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д,$$

$$l_{Q_0} = l_д - l_a = l_д - \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д =$$

$$= l_д \frac{q}{Q_0 + q},$$

$l_{Q_0} = 0{,}51$ *дм.*

	$\lg l_д$	1,1021
(+)	$\lg q$	1,3604
	$\operatorname{colg}(Q_0 + q)$	$\bar{3}$,2419
	$\lg l_{Q_0}$	1,7044
	l_{Q_0}	0,5063

51) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 1435$ *кг.*
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 17{,}60$ *дм.*
Вес снаряда . . . . . $q = 41{,}00$ *кг.*
Вес откатных частей и снаряда . . $Q_0 + q = 1476$ *кг.*

$$l_a = \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д,$$

$$l_{Q_0} = l_д - l_a = l_д - \frac{Q_0}{Q_0 + q}\, l_д =$$

$$= l_д \frac{q}{Q_0 + q},$$

$l_{Q_0} = 0{,}49$ *дм.*

	$\lg l_д$	1,2455
(+)	$\lg q$	1,6128
	$\operatorname{colg}(Q_0 + q)$	$\bar{4}$,8310
	$\lg l_{Q_0}$	$\bar{1}$,6893
	l_{Q_0}	0,4890

52) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 5300{,}10$ *кг.*
Длина нарезной части . . . . . $l_д = 131{,}5$ *дм.*
Вес снаряда . . . . . $q = 385{,}9$ *кг.*
Вес откатных частей и снаряда . . . . $Q_0 + q = 5339{\cdot}10$ *кг.*

$$l_a = \frac{Q_0}{Q_0 + q} l_д,$$

$$l_{Q_0} = l_д - l_a = l_д - \frac{Q_0}{Q_0 + q} l_д =$$

$$= l_д \frac{q}{Q_0 + q},$$

$$l_{Q_0} = 0{,}95 \text{ дм}.$$

	$\lg l_д$	2,1189
(+)	$\lg q$	2,5865
	$\operatorname{colg}(Q_0 + q)$	$\overline{5}$,2726
	$\lg l_{Q_0}$	1,9780
	l_{Q_0}	0,9506

Задачи 53—54. Вычисление работы A_5 при абсолютной и относительной скоростях.

53) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные:

Вес снаряда	q	= 6,55 *кг*
Вес заряда	ω	= 0,879 *кг*
Вес откатных частей	Q_0	= 470,0 *кг*
Дульная скорость	$v_д$	= 5882 *дм/сек*
Ускорение силы тяжести	g	= 98,10 *дм/сек*^{2}

Абсолютная скорость

$$v_a = v - V_0$$

$$v_a = 5882{,}0 - 87{,}5 =$$

$$= 5794{,}5 \text{ дм/сек}$$

$$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0}{2g}\left(\frac{q + \frac{1}{2}\omega}{Q_0 + \frac{1}{2}\omega}\right)^2 v_a^2 =$$

$$= 1776 \cdot 10 \text{ кг} \cdot \text{дм}$$

	$\lg v_a$	3,7630
	q	6,55
(+)	$\frac{1}{2}\omega$	0,44
	$q + \frac{1}{2}\omega$	6,99
	$\lg\left(q + \frac{1}{2}\omega\right)$	0,8445
	Q_0	470,0
	$\left(Q_0 + \frac{1}{2}\omega\right)$	470.4
	$\operatorname{colg}\left(Q_0 + \frac{1}{2}\omega\right)$	$\overline{3}$.3275
	$\lg Q_0$	2,6721
	$2\lg\left(q + \frac{1}{2}\omega\right)$	1,6890
(+)	$2\lg v_a$	7,5260
	$\operatorname{colg} 2g$	3.7073
	$2\operatorname{colg}\left(Q_0 + \frac{1}{2}\omega\right)$	6,6550
	$\lg \mathbf{A}_5$	4,2494
	A_5	1776·10

Работа $\mathbf{A}_5$ при относительной скорости

$$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0}{2g}\left(\frac{q + \frac{1}{2}\omega}{Q_0 + q + \omega}\right)^2 v^2 =$$

$$= 1776 \cdot 10 \text{ кг} \cdot \text{дм}.$$

	Q_0	470,00
(+)	q	0,9
	ω	6,6
	$(Q_0 + q + \omega)$	477,5
	$\operatorname{colg}(Q_0 + q + \omega)$	3,3210
	$\lg Q_0$	2.6721
	$2\lg\left(q + \frac{1}{2}\omega\right)$	1,6890
(−)	$2\lg v$	7,5390
	$\operatorname{colg} 2g$	$\overline{3}$,7073
	$2\operatorname{colg}(Q_0 + q + \omega)$	6.6420
	$\lg \mathbf{A}_5$	4,2494
	$\mathbf{A}_5$	1776·10

Таким образом, величина работы $\mathbf{A}_5$ при абсолютной и относительной скоростях получилась одинаковой.

$\mathbf{A}_5$, вычисленное ранее по другой формуле при относительной скорости v, равнялось 1754·10 *кг·дм*. Таким образом, разница получилась в большую сторону около 1,2%.

54) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные:

Вес снаряда	q	= 41,0 *кг*
Вес заряда	ω	2,15 *кг*
Вес откатных частей	Q_0	= 1435 *кг*
Дульная скорость	$v_д$	= 3810 *дм/сек*
Ускорение силы тяжести	g	= 98,10 *дм/сек²*

Абсолютная скорость:

$$v_a = v - V_0$$

$$v_a = 3810 - 112 =$$

$$= 3698 \text{ дм/сек}$$

$$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0}{2g}\left(\frac{q+\frac{1}{2}\omega}{Q_0+\frac{1}{2}\omega}\right)^2 v_a^2 =$$

$$= 8584 \cdot 10 \text{ кг. дм.}$$

Работа $\mathbf{A}_5$ при относительной скорости:

$$\mathbf{A}_5 = \frac{Q_0}{2g}\left(\frac{q+\frac{1}{2}\omega}{Q_0+q+\omega}\right)^2 v^2 =$$

$$= 8592 \cdot 10 \text{ кг. дм.}$$

$\lg v_a$	3,5680
(+) q	41,00
$\frac{1}{2}\omega$	1,08
$q+\frac{1}{2}\omega$	42,08
$\lg\left(q+\frac{1}{2}\omega\right)$	1,6240
Q_0	1435,0
$\left(Q_0+\frac{1}{2}\omega\right)$	1436,1
$\operatorname{colg}\left(Q_0+\frac{1}{2}\omega\right)$	$\overline{4},8428$
$\lg Q_0$	3,1568
$2\lg\left(q+\frac{1}{2}\omega\right)$	3,2480
(+) $2\lg v_a$	7,1360
$\operatorname{colg} 2g$	$\overline{3},7073$
$2\operatorname{colg}\left(Q_0+\frac{1}{2}\omega\right)$	$\overline{7},6856$
$\lg \mathbf{A}_5$	4,9337
$\mathbf{A}_5$	8584·10

Q_0	1435
(+) q	2
ω	41
$Q_0+q+\omega$	1478
$\operatorname{colg}(Q_0+q+\omega)$	$\overline{4},8304$
$\lg Q_0$	3,1568
$2\lg\left(q+\frac{1}{2}\omega\right)$	3,2480
(+) $2\lg v$	7,1618
$\operatorname{colg} 2g$	$\overline{3},7073$
$2\operatorname{colg}(Q_0+q+\omega)$	$\overline{7},6602$
$\lg \mathbf{A}_5$	4,9341
$\mathbf{A}_5$	8592·10

Сравнивая между собою результаты вычислений работы $\mathbf{A}_5$, видим, что в данном случае имеется некоторая разница в величине $\mathbf{A}_5$ при абсолютной и относительной скоростях, составляя, всего около 0,09%. Практически такая незначительная разница не имеет значения.

Задача 55. Вычисление импульса отдачи ствола.

Испанская винтовка системы Аметральядора.

Исходные данные

Вес пули . . . . . $q = 0{,}0110$ *кг*.
Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}00245$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 4{,}00$ *кг*.
Дульная скорость . . . . . $v_д = 6850$ *дм/сек*.

Величину импульса отдачи в момент вылета можно подсчитать по формуле:

$$J = \frac{Q_0}{g} V_{0д} = \frac{q + \theta\omega}{g} v_д.$$

Максимальная величина импульса за все время действия пороховых газов в канале ствола, отвечающая моменту наибольшей отдачи:

$$J_{max} = \frac{Q_0}{g} V_{0max} = \frac{q + \beta\omega}{g} v_д,$$

	q	0,0110		q	0,0110
(+)	$\theta\omega$	0,0012	(+)	$\beta\omega$	0,0049
	$(q + \theta\omega)$	0,0122		$(q + \beta\omega)$	0,0159
	$\lg (q + \theta\omega)$	$\bar{2}$,0864		$\lg (q + \beta\omega)$	$\bar{2}$,2014
+	$\lg v_д$	3,8357	(+)	$\lg v_д$	3,8357
	$\operatorname{colg} g$	$\bar{2}$,0083		$\operatorname{colg} g$	$\bar{2}$,0083
	$\lg J$	$\bar{1}$,9304		$\lg J_{max}$	0,0454
	J	0,8519		J_{max}	1,110

где β—эмпирический коэфициент, зависящий от скорости.

Для винтовок $\beta \approx 2$.

$J = 0{,}852$ *кгсек*.

$J_{max} = 1{,}110$ *кгсек*.

Скорости отдачи при этом будут:

$$V_{0д} = \frac{Jg}{Q_д} = 20{,}9 \text{ дм/сек}.$$

$$V_{0max} = \frac{J_{max} g}{Q_0} = 27{,}2 \text{ дм/сек}.$$

	$\lg J$	$\bar{1}$,9304		$\lg J_{max}$	0,0454
(+)	$\lg g$	1,9917	(+)	$\lg g$	1,9917
	$\operatorname{colg} Q_д$	$\bar{1}$,3979		$\operatorname{colg} Q_0$	$\bar{1}$,3979
	$\lg V_{0д}$	1,3200		$\lg V_{0max}$	1,4350
	$V_{0д}$	20,89		V_{0max}	27,23

§ 24. НАГРЕВАНИЕ СТВОЛА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

Пороховые газы, охлаждаясь под влиянием стенок канала ствола, теряют часть своей тепловой энергии.

Вопрос этот очень сложен, и до сих пор, несмотря на целый ряд опытов, не имеется точного представления о величине этой потери.

Незначительное число теоретических изысканий по определению величины тепловой потери дает разноречивые данные, не согласовывающиеся с имеющимся более богатым экспериментальным материалом.

Главная часть опытов относится к стволам стрелкового оружия, причем постановка большинства опытов настолько различна, что подчас результаты опытов трудно сравнимы. Опытами определялось то количество тепла, которое отдано стенкам канала при каждом выстреле, при разных режимах и условиях стрельбы, до момента полного освобождения канала от пороховых газов.

В это количество тепла, отданное стенкам ствола, входит количество тепла, переданное стенками до момента вылета снаряда, и то тепло, которое передается стенкам после вылета, до момента полного освобождения канала от пороховых газов. Для правильного же учета работ, совершаемых пороховыми газами, необходимо знать только то количество тепла, которое вследствие отдачи стенкам потеряно пороховыми газами до момента вылета снаряда.

Опытов, определяющих именно эту часть потерь, не имеется.

Стенки канала ствола нагреваются от непосредственного соприкосновения с раскаленными пороховыми газами, а также получают еще тепло от трения ведущего пояска снаряда, от трения пороховых газов о стенки, от ударов частиц пороховых газов и, наконец, от дополнительных химических реакций между продуктами горения.

Учет этих тепловых потерь до некоторой степени производится теми формулами, которые определяют работу, затрачиваемую на преодоление трения ведущего пояска при движении по нарезам (A_3) и при врезании его в нарезы, а также может быть произведен формулами, учитывающими работы на трение газов и на упругие деформации стенок ствола орудия. При этом, как было отмечено выше, некоторая часть потерь от непосредственного нагревания, а также часть потерь от трения газов и упругих деформаций будет иметь место уже после вылета снаряда из канала ствола орудия. При решении основной задачи внутренней балистики всеми тепловыми потерями совершенно пренебрегают.

Потеря от непосредственной передачи тепла раскаленными газами стенкам будет зависеть от разности температур, от вели-

чины поверхности, от продолжительности соприкосновения пороховых газов со стенками ствола орудия и от материала его стенок.

Юстров, определяя эту потерю за время движения снаряда по каналу, дает следующую формулу:

$$Q_T = \zeta Ft\ (T - T_{пов}),$$

где ζ — коэфициент теплоотдачи (опытная, малоизвестная величина), F — величина поверхности в квадратных метрах, t — продолжительность перехода теплоты в часах, T — температура порохового газа в градусах, $T_{пов}$ — температура поверхности канала ствола в градусах.

Вычисления величины Q_T по этой формуле для различных артиллерийских систем приводят к следующим результатам, сведенным Юстровым в табл. 7, где дана также для сравнения величина дульной энергии.

Таблица 7

Артсистема	Q_T	Дульная энергия в калориях
8-*мм* винтовка	0,23	0,97
7,5-*см* пушка	76,4	151,0
10,5-*см* пушка	298,0	813,0
10,5-*см* гаубица	82,6	415,0
15-*см* пушка	687,0	3910,0
15-*см* гаубица	226,0	1210,0
42-*см* пушка большой дальности	14 350,0	86 000,0
42-*см* гаубица	4900,0	25 800,0

Из приведенной таблицы находим, что потери тепла Q_T очень велики, составляя от 16,7 до 50,6% от дульной энергии.

Далее Юстров указывает, что эти результаты надо рассматривать как приближенные, но и в этом случае мы видим, что величиной этой потери энергии пренебрегать нельзя.

Если же учесть нагревание ствола от трения и врезания ведущего пояска, то на нагрев ствола по данным Юстрова расходуется от 5 до 20% всей энергии заряда.

Оттенхеймер в своем курсе „Внутренняя балистика" указывает, что количество тепловой энергии, поглощенной орудием, равняется приблизительно 20% от работы A_1, затрачиваемой на поступательное движение снаряда. Это составляет около 7% от потенциальной энергии заряда.

У Брунсвига имеются данные, по которым у винтовок потеря тепловой энергии доходит до $23^0/_0$ от всей энергии порохового заряда.

Большой интерес представляет работа Мюраура, который определял тепловые потери в орудии, пользуясь опытными данными, полученными при сжигании пороха в манометрической бомбе.

Свои рассуждения Мюраур строит на целом ряде допущений, считая, что теплоотдача происходит исключительно конвекцией (удары молекул) и что число ударов молекул пороховых газов о стенки бомбы пропорционально давлению p и времени t, т. е. пропорционально импульсу давления $J = \int_0^t p\,dt$.

Если считать, что импульс давления не зависит от плотности заряжения Δ, то для данного пороха потеря тепла через единицу поверхности стенок постоянна для любого значения Δ. Предполагая далее, что потеря тепла в процентах пропорциональна отношению $\frac{S_б}{\omega}$, где $S_б$ — поверхность охлаждения в бомбе, а ω — вес заряда, Мюраур дает формулу для относительного изменения температуры вследствие теплоотдачи стенкам бомбы в следующем виде:

$$\frac{\Delta T}{T}{}^0/_0 = \frac{C_M}{7{,}774}\frac{S_б}{\omega}$$

или

$$\frac{\Delta T}{T}{}^0/_0 = \frac{C_M}{7{,}774}\frac{S_б}{W_0}\frac{1}{\Delta},$$

где W_0 — объем бомбы, C_M — некоторый коэфициент Мюраура, зависящий от толщины и природы пороха.

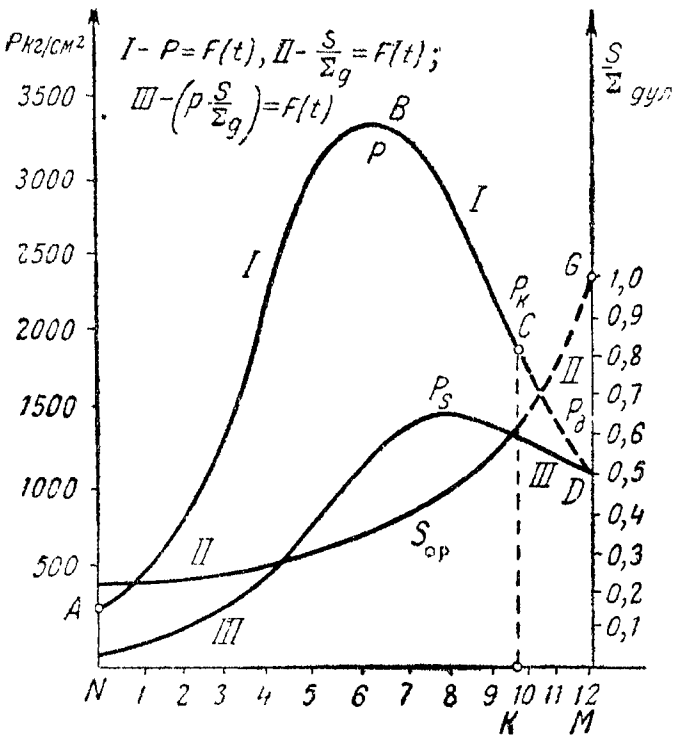
C_M определяется графически по кривой потери температуры в процентах от времени сгорания пороха в бомбе емкостью в 150 $см^3$, при $\Delta = 0{,}20$. Отношение $\frac{S_б}{\omega}$ при этом будет равно 7,774.

Для определения потери тепла в калориях Q имеется также графическая зависимость температуры от $\frac{\Delta Q}{Q}$ в процентах.

Применить в таком виде эту формулу для определения потери тепла от соприкосновения пороховых газов с холодными стенками ствола орудия нельзя, так как поверхность охлаждения в нем будет изменяться. Взять отношение $\frac{S_{ор}}{\omega}$ для момента вылета снаряда из орудия не представляется возможным, так как мы допустили бы значительную ошибку.

Для учета теплоотдачи в орудии Мюраур поступает следующим образом.

Строятся кривые давления в зависимости от времени $p = F(t)$ и относительного изменения поверхности соприкосновения с газами, также в зависимости от времени $\frac{S_{ор}}{\Sigma_д} = F(t)$, где через $\Sigma_д$ обозначена полная поверхность охлаждения в момент вылета снаряда (фиг. 47).



Фиг. 47.

Потеря тепла через стенки пропорциональна как поверхности охлаждения, так и давлению. Поэтому для учета теплоотдачи в орудии следует перемножить ординаты имеющихся кривых *I* и *II*.

Полученная в результате кривая $\left(p\frac{S_{ор}}{\Sigma_д}\right) = F(t)$ (*III* на фиг. 47) дает возможность определить ту поправку, которую следует ввести в выражение $\left(\frac{C_M}{7{,}774}\frac{\Sigma_д}{\omega}\right)$, полученное для всей поверхности охлаждения канала в момент вылета снаряда. Площадь, ограниченная кривой *III*, составляет 43% от площади *ABCKN* и 43% от площади кривой $p = F(t)$, полученной в бомбе. С помощью полученного множителя 0,43 и находится потеря на теплоотдачу.

Результаты такого исследования дают возможность Мюрауру сделать заключение, что нагревание орудия в большей степени зависит от механических причин, а охлаждающее действие стенок не играет существенной роли.

Для 15-*см* германской пушки потеря на теплоотдачу выразилась в 1,1%, а для винтовки в 15%.

Проф. М. Е. Серебряков показал, что теплоотдачу в орудии можно учесть проще, без построения кривых для давления и относительного изменения поверхности охлаждения в функции от времени.

Проф. М. Е. Серебряков дает формулу для учета теплоотдачи от начала горения пороха до момента вылета снаряда в следующем виде:

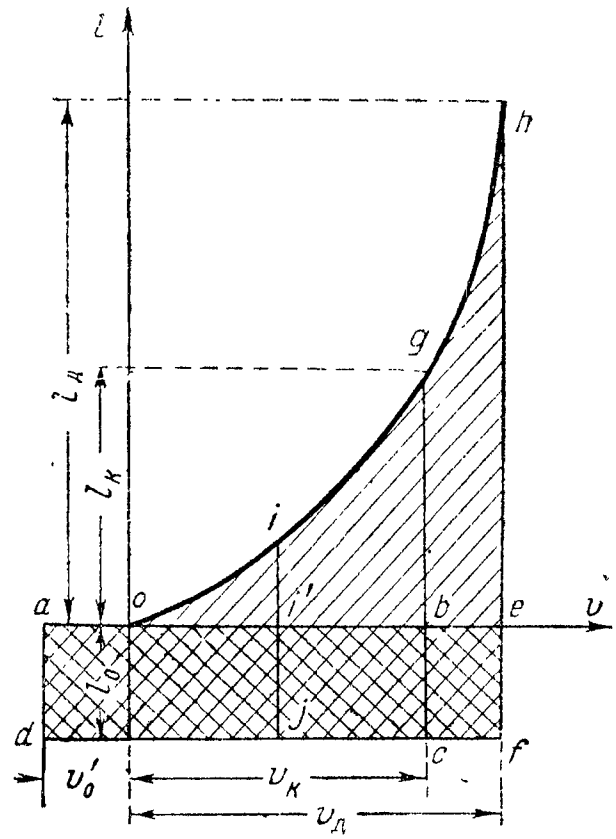
$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_д\% = \frac{C_M}{7{,}774}\frac{\Sigma_9}{\omega}\eta_д,$$

где Σ_0 — поверхность каморы, $\eta_д$ — коэфициент, представляющий собой отношение полной потери на теплоотдачу всего канала с учетом того, что части поверхности его вступают в действие постепенно, по мере продвижения снаряда, к потере на теплоотдачу поверхности каморы, с площадью дна снаряда к концу горения пороха.

Для любого момента времени дается формула такого же вида:

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)\% = \frac{C_M}{7{,}774}\,\frac{\Sigma_0}{\omega}\,\eta_l,$$

где η_l — коэфициент, представляющий собой отношение теплоотдачи канала в данный момент к теплоотдаче каморы в конце горения.



Фиг. 48.

Отношения η_l и $\eta_{lд}$ можно определить из графика $l = F(v)$ (фиг. 48) или из обычного графика $v = F(l)$, если учесть, что они представляются следующим образом:

$$\eta_{lд} = \frac{l_0\,(v_0' + v_д) + \int_0^{v_д} l\,dv}{l_0\,(v_0' + v_д)} = \frac{\text{площ. } aefd + \text{площ. } 0ghe0}{\text{площ. } abcd}.$$

и

$$\eta_l = \frac{l_0\,(v_0' + v) + \int_0^{v} l\,dv}{l_0\,(v_0' + v_к)} = \frac{\text{площ. } ai'jd + \text{площ. } 0ii'}{\text{площ. } abcd}.$$

Здесь l_0 есть приведенная длина каморы, а v_0' есть некоторая условная скорость, которую имел бы снаряд при отсутствии форсирования, когда сгорит часть заряда ψ_0, отвечающая давлению форсирования p_0.

Результаты подсчета по этим формулам показывают, что потеря на теплоотдачу стенкам орудия должна учитываться.

Из табл. 8 видно, что потеря на теплоотдачу колеблется от 1,35% для 152-*мм* пушки до 10,44% для винтовки.

Таблица 8

Система / Потери на теплоотдачу	152/10	107/10	76/02	76/09	76/27	45-*мм*	37-*мм*	7,62 драгунск. винтовка
$\frac{\Delta T}{T}$ %	0,89	1,64	2,10	1,82	2,40	1,52	2,04	6,96
$\frac{\Delta Q}{Q}$ %	1,35	2,50	3,15	2,73	3,60	2,27	3,06	10,44

На основании сравнения полученных цифр с результатами опытов в бомбе проф. М. Е. Серебряков считает, что в среднем для орудий калибром от 37 *мм* до 107 *мм* можно не вводить поправку на теплоотдачу, так как употребляемая величина силы пороха *f*, полученная из опытов в бомбе, меньше действительной на 4—5%. Для винтовок и орудий калибра 152 *мм* и выше поправку вводить следует.

Далее следует упомянуть еще о работах Хирша, в которых величина тепловых потерь определялась по разности между вычисленными с помощью обычных формул работами и действительными работами. В результате было найдено, что для 15-*см* мортиры теплоотдача стенкам составляет 17% от дульной энергии, что достаточно близко к данным, полученным Юстровым. Остальные потери выразились в сумме 30% от дульной энергии.

Среди опытов по непосредственному определению нагрева ствола следует отметить опыты С. Робера, относящиеся к ружейным стволам при различных условиях заряжания. Между прочим при холостой стрельбе был получен более сильный нагрев, чем при нормальных условиях заряжания. Это можно объяснить большей продолжительностью нагревания ствола в этом случае вследствие более медленного сгорания пороха. Нагрев стенок ствола от одного выстрела уменьшался с увеличением числа выстрелов в серии.

Нобль и Эйбль определяли нагрев стволов, помещая оружие после выстрела в бак с водой. Потеря теплоты на каждый грамм пороха получалась около 100 малых калорий или около 14 — 16% всей теплоты горения пороха.

По опытам Бертрана и Ляроша, помещавших в калориметры нагретые ружья и изучавших их охлаждение, также было получено, что увеличение температуры ствола растет медленнее, чем увеличение числа выстрелов в минуту. Для данного режима стрельбы нагрев ствола постепенно замедляется и в дальнейшем растет очень медленно.

Кранц и Роте определяли среднюю температуру стволов по изменению электрического сопротивления. Они получили формулу для нагрева ствола от каждого выстрела в зависимости

от числа предыдущих выстрелов, при определенной скорости стрельбы (2 выстрела в 1 мин.):

$$\Delta t^\circ = 3{,}2(1 - 0{,}01x)^2,$$

где x — число выстрелов, меньшее или равное 100.

Постоянная температура устанавливалась после 100 выстрелов. При холостых выстрелах нагрев получался меньше.

Имеющийся опытный материал не дает представления о влиянии калибра и сорта пороха на величину тепловой потери.

По имеющимся данным повышение температуры ствола от одного выстрела получается также различным.

По опытам Кранца повышение температуры в разных сечениях в среднем около 3°.

Результаты, полученные Юстровым, приведены в табл. 9.

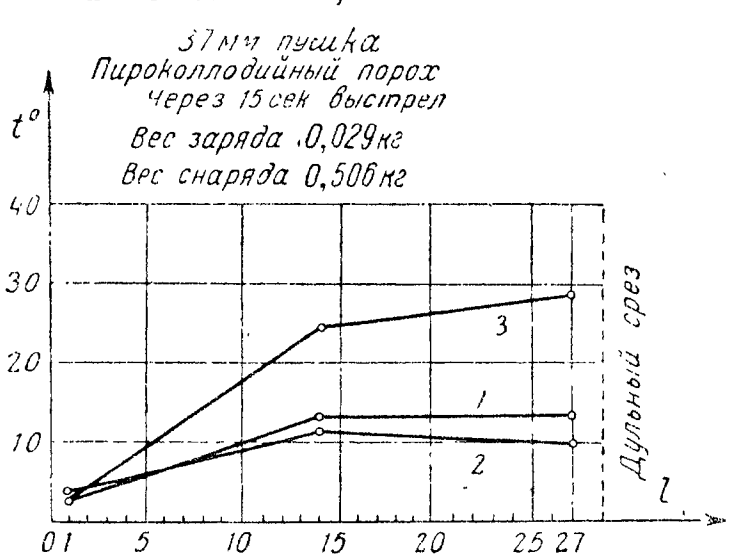
Для пушек большой мощности нагрев от одного выстрела колеблется в пределах от 6 до 10°.

Шарбонье отмечает значение первого выстрела, поглощающего наибольшее количество тепла по сравнению с последующими выстрелами. С этим выстрелом связаны также некоторые изменения в самой стали.

Таблица 9

Артсистема	Повышение температуры от одного выстрела
8-*мм* винтовка .	1,4°
15-*см* пушка . .	1,2°
42-*см* пушка . .	0,85°
15-*см* гаубица . .	2,3°
42-*см* гаубица .	2,0°

Опыты по определению распределения температуры вдоль канала ствола показывают, что меньше всего нагревается камора.



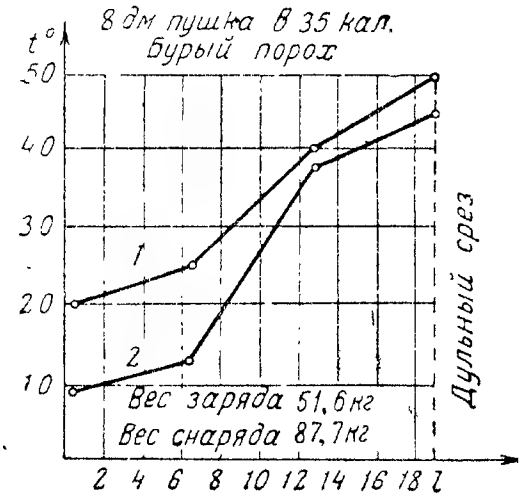
Фиг. 49. 37-*мм* пушка. Пироколлодийный порох: *1* — 10 выстрелов, *2* — 18 выстрелов, *3* — 40 выстрелов.

Распределение температуры вдоль канала по данным Комиссии морских артиллерийских опытов 1894 г. изображено на фиг. 49 и 50.

Температура определялась в канале ствола орудия с помощью максимальных пирометров, вдвигавшихся на стержне с перегородками в канал ствола после ряда выстрелов. Более сильный нагрев наблюдался в дульной части. В случае дымных порохов нагрев получался более значительным.

По опытам Кранца и Роте, а также по данным французских опытов, наибольший нагрев получался в средней части канала (фиг. 51).

Проф. В. Швиннинг указывает, что при длительной стрельбе из винтовок наблюдается „поразительное явление", состоящее в том, что дульная часть ствола нагревается выше, чем утолщенная казенная часть. Это явление он связывает с условиями проводимости тепла, а также с влиянием вихреобразований при выходе пороховых газов из канала винтовки.



Фиг. 50. 8-дюймовая пушка в 35 калибров. Бурый порох:

1—16 выстрелов, *2*—13 выстрелов.

Следует заметить, однако, что существование этих вихреобразований у дульного среза представляется маловероятным.

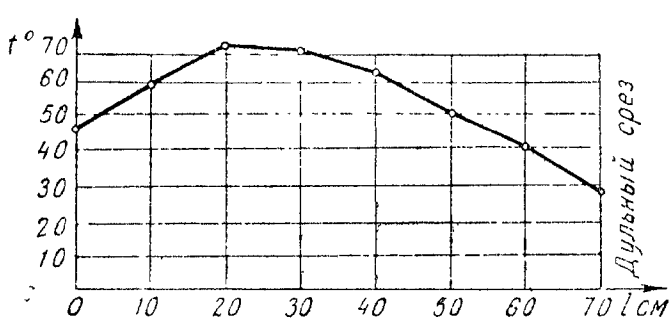
Нагревание орудия может быть весьма значительным. В частности, по некоторым данным, для пулеметов и автоматических пушек, дающих до 600 выстрелов в минуту, температура может доходить до 200 — 250°.

По данным проф. Швиннинга нагревание винтовочных стволов и пулеметных с водяным охлаждением достигает 200°. Для пулеметных стволов с воздушным охлаждением температура нагрева возрастает до 400 — 700°.

Температура нагрева поверхностного слоя канала по целому ряду данных очень велика.

Габо указывает, что нагрев от обжатия ведущего пояска при врезании достигает 700 — 1100°. Такие же примерно данные находим у Пиантаниды (800°).

Редже считает, что поверхностный слой орудия при выстреле достигает температуры 300 — 500°.



Фиг. 51.

На более высокий нагрев поверхностного слоя до 700°, а в некоторых случаях и выше имеются указания у проф. В. Швиннинга. Он указывает, что в момент выстрела поверхности канала передается очень большое количество тепла, которое не успевает проникнуть в глубь металла вследствие чрезвычайно малой продолжительности явления выстрела.

Даваемое им схематическое распределение температуры в толщине стенки ствола огнестрельного оружия в различные моменты времени показано на фиг. 52.

Нагревание поверхностного слоя играет большую роль в процессе изменения и разрушения поверхности канала. Вопрос этот будет рассмотрен в § 26 —30.

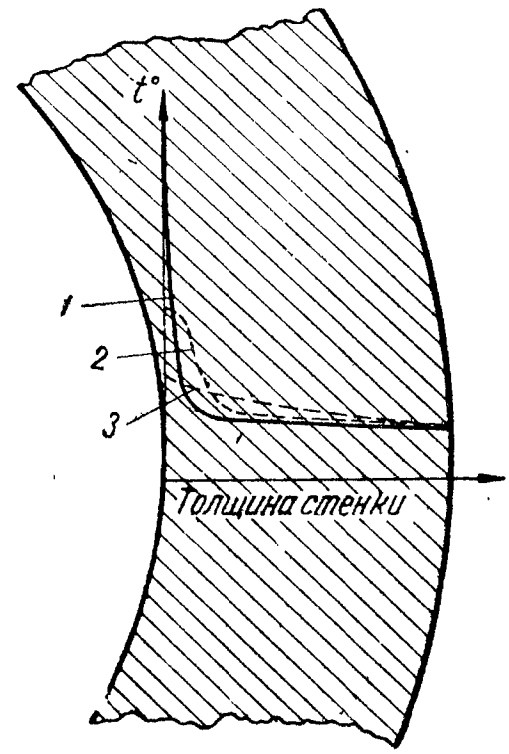
Повышение температуры ствола огнестрельного оружия может также повлиять на ход процесса воспламенения и горения пороха. Наконец, вследствие нагрева изменяются размеры каморы и канала ствола.

Между прочим, по данным Оттенхеймера нагрев орудия до 200° не давал систематических отклонений в величине начальных скоростей и давления.

Учитывая влияние нагрева ствола, следует соблюдать известный режим стрельбы, не допускающий значительного нагрева огнестрельного оружия.

Кроме потери тепловой энергии, связанной с нагревом ствола, следует упомянуть еще о потерях теплоты, связанных с прорывом пороховых газов.

Как увидим в гл. V, факт появления газов у дульного среза до вылета снаряда вследствие прорыва газов в настоящее время достаточно ясно зафиксирован с помощью фотографии и кино.



Фиг. 52.
1—в момент выстрела; *2*—позже; *3*—еще позже.

Этот прорыв вокруг ведущего пояска снаряда может иметь место, вообще говоря, не только в начальные моменты, когда поясок еще не врезался на полную глубину нарезов, но и во время движения по нарезной части канала, когда с истиранием боевой грани ведущего пояска появляется некоторый зазор между выступом пояска и нарезом, могущий способствовать прорыву газа.

Определенных данных относительно прорыва пороховых газов во время движения снаряда по каналу после врезания на полную глубину нарезов не имеется.

В настоящее время не имеется решения вопроса об учете теплоотдачи стенкам огнестрельного оружия, необходимого для точного решения основной задачи внутренней балистики и установления режима стрельбы без значительного перегрева, вредно сказывающегося на износе канала и однообразии дульных скоростей.

И если все же, несмотря на значительные потери тепловой энергии, при расчетах получаются хорошие результаты, то это можно отнести за счет различных эмпирических коэфициентов. По вопросу о теплоотдаче необходимы дальнейшие исследования.

§ 25. РАБОТА, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТЕНОК СТВОЛА

При выстреле стенки ствола деформируются, отчего изменяется объем заснарядного пространства. Вопрос этот будет интересовать нас с точки зрения определения работы пороховых газов, затрачиваемой на упругие деформации стенок ствола.

Работу эту представим в следующем виде:

$$\mathbf{A}_{\text{деф}} = \int_0^W p\,dW, \tag{74}$$

где W — объем заснарядного пространства.

Часть затраченной энергии пороховых газов будет возвращаться, так как по мере уменьшения давления в каждом сечении орудия будет происходить сжатие газа.

Введем для тангенциальной и осевой деформаций, производимых собственно выстрелом, обычно принимаемые обозначения k_1'' и λ''. Заснарядное пространство будем рассматривать как цилиндр длиной $(l_0 + l)$, с радиусом r_1.

Так как под действием давления радиус канала будет равен:

$$r_1(1 + k_1''),$$

а длина канала будет равна:

$$(l_0 + l)(1 + \lambda''),$$

то увеличение объема канала получим в следующем виде:

$$\pi r_1^2 (1 + k_1'')^2 (1 + \lambda'')(l_0 + l).$$

Пренебрегая величинами второго порядка, будем иметь:

$$\pi r_1^2 (l_0 + l)(2k'' + \lambda'').$$

Величина работы $\mathbf{A}_{\text{деф}}$ получится равной:

$$\mathbf{A}_{\text{деф}} = \pi r_1^2 (l_0 + l_{\text{д}})(2k_1'' + \lambda'')\, p_{\text{д}},$$

или

$$\mathbf{A}_{\text{деф}} = s(l_0 + l_{\text{д}})(2k_1'' + \lambda'')\, p_{\text{д}}, \tag{75}$$

где $p_{\text{д}}$ представляет собою давление газов в момент вылета снаряда.

Деформации k_1'' и λ'' определяются соответствующими формулами из теории проектирования орудий:

$$k_1'' = \frac{1}{3E_1} \frac{4r_{n+1}^2 + r_1^2}{r_{n+1}^2 - r_1^2}\, p,$$

$$\lambda'' = \frac{1}{3E_1} \frac{r_1^2}{r_{n+1}^2 - r_1^2}\, p,$$

где E_1 — коэфициент упругости металла ствола орудия;

p — среднее давление в заснарядном пространстве рассматриваемой длины l;

r_1 и r_{n+1} — внутренний и наружный радиусы канала ствола.

Окончательно, после подстановки значений k_1'' и λ'' в уравнение 75 для $\mathbf{A}_{\text{деф}}$, найдем выражение работы $\mathbf{A}_{\text{деф}}$:

$$\mathbf{A}_{\text{деф}} = \frac{2}{3} s (l_0 + l_д) \frac{4r_{n+1}^2 + 1{,}5r_1^2}{r_{n+1}^2 - r_1^2} \frac{p_д^2}{E_1}. \tag{76}$$

Максимальная величина работы будет зависеть как от давления, так и от поверхности, подверженной растягивающему стенки давлению. Поэтому для определения полной работы на деформацию стенок величину p следует брать соответственно моменту вылета снаряда.

Вследствие разности в диаметре вдоль канала ствола работу следует определять для различных частей ствола орудия.

Величина работы по вышеприведенной формуле, получающейся несколько преувеличенной (Кранц), выражается в сотых долях процента от $\mathbf{A}_1$, а поэтому эта работа обычно не учитывается.

Изменение объема заснарядного пространства, по мнению Острова, влечет за собой усиление износа боевой грани из-за уменьшения поверхности соприкосновения боевой грани выступа и нареза, а также способствует разгару стенок ствола вследствие прорыва газов в щели между ведущим пояском и стенками ствола. По данным, приведенным Островым, у крупных калибров увеличение внутреннего диаметра достигает 1 *мм*.

Изменение величины давления вследствие изменения объема лежит за пределами точности измерения.

Здесь следует упомянуть еще о явлении вибрации ствола, о котором имеется очень мало данных. Учет этого явления и затрачиваемой на него работы пороховых газов крайне затруднителен, и им обычно пренебрегают.

Задача 56. **Вычисление работы, затрачиваемой на упругие деформации стенок ствола.**

76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Внутренний радиус	$r_1 = 7{,}62$ *см*.
Средний наружный радиус орудия	$r_{n+1} = 17{,}02$ *см*.
Длина нарезной части	$l_д = 184{,}4$ *см*.
Приведенная длина каморы	$l_0 = 36{,}2$ *см*.
Площадь поперечного сечения канала	$s = 4693$ *см*^{2}.
Коэфициент упругости металла	$E_1 = 2000 \cdot 10^3$.
Давление пороховых газов в момент вылета	$p_д = 650$ *кг/см*^{2}.

Принимая заснарядное пространство как цилиндрический канал с поперечным сечением s и длиной $(l_0 + l_д)$, имеем формулу:

$$\mathbf{A}_{\text{деф}} = \frac{2}{3} s (l_0 + l_д) \frac{4r_{n+1}^2 + 1{,}5 r_1^2}{r_{n+1}^2 - r_1^2} \frac{p_д^2}{E_1} =$$

$$= \frac{2}{3} s (l_0 + l_д) \frac{4 \left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2 + 1{,}5}{\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2 - 1} \frac{p_д^2}{E_1}.$$

$\lg r_{n+1}$	1,2309
(+)	
$\operatorname{colg} r_1$	$\overline{1},1180$
$\lg\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)$	0,3489
$2\lg\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)$	0,6978
$\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2$	4,986
$(l_0 + l_д)$	220,6
$\lg p_д$	2,8129

$\lg 4$	0,6021
(+)	
$\lg\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2$	0,6978
$\lg 4\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2$	1,2999
$4\left(\frac{r_{n-1}}{r_1}\right)^2$	19,95
$4\left(\frac{r_{n-1}}{r_1}\right)^2 + 1{,}5$	21,45
$\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2 - 1$	3,986

$\lg 2$	0,3010
$\lg s$	1,6715
$\lg(l_0 + l_д)$	2,3436
$\lg\left[4\left(\frac{r_{n-1}}{r_1}\right)^2 + 1{,}5\right]$	1,3314
(+) $2\lg p_д$	5,6258
$\operatorname{colg} 3$	$\overline{1},5229$
$\operatorname{colg}\left[\left(\frac{r_{n+1}}{r_1}\right)^2 - 1\right]$	$\overline{1},3994$
$\operatorname{colg} E_1$	$\overline{7},6990$
$\lg \mathbf{A}_{деф}$	3,8946
$\mathbf{A}_{деф}$	7845

$\mathbf{A}_{деф} = 784$ *кгдм.*

$$\frac{\mathbf{A}_{деф}}{\mathbf{A}_1} = \frac{784}{1154 \cdot 10^3} = 0{,}0007 = 0{,}07\%.$$

§ 26. ИЗНОС КАНАЛА СТВОЛА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Продолжительная стрельба вызывает различного рода разрушения канала огнестрельного оружия, которые постепенно приводят оружие в негодность. Ухудшаются балистические качества, падает меткость, и оружие теряет свою боеспособность.

Вопрос об износе канала ствола огнестрельного оружия, связанный с продолжительностью службы оружия, является чрезвычайно важным.

Особенную актуальность этот вопрос приобретает в военное время, имея непосредственную связь с боеспособностью войск.

Явление износа ствола, определяющее срок службы огнестрельного оружия, надо принимать во внимание при его проектировании, и задача об увеличении срока службы оружия должна разрешаться наряду с балистическими, тактическими и технологическими задачами.

С давних пор артиллеристы занимались исследованием причин износа орудий, и в данное время имеется достаточно большой материал, особенно обогатившийся во время империалистической войны 1914 — 1918 гг.

Износ ствола влечет за собою увеличение объема и площади поперечного сечения канала, уменьшение плотности заряжания и длины пути снаряда, уменьшение давления форсирования, а также в значительной мере способствует прорыву пороховых газов. В результате уменьшается дульная скорость, а следовательно, и дальность полета снаряда.

Неправильность полета такого снаряда сильно снижает меткость стрельбы, и естественно, что действительность такого артиллерийского огня чрезвычайно невелика.

Сказанное относится полностью и к стрелковому оружию.

Имеющийся в настоящее время материал показывает, что величина износа канала ствола огнестрельного оружия усиливается с увеличением калибра и длины его канала.

Если винтовки и пулеметы (с водяным охлаждением) при большой скорострельности выдерживают десятки тысяч выстрелов, то живучесть легких орудий исчисляется только тысячами выстрелов.

Для орудий же более крупных калибров количество выстрелов без особого снижения меткости будет всего лишь несколько сот, а орудия калибра 420 *мм* и выше едва выдерживают десятки выстрелов.

До нескольких тысяч, а иногда и сотен выстрелов снижается предельное число выстрелов для пулеметных стволов с воздушным охлаждением.

Следует отметить, что данные о продолжительности службы огнестрельного оружия являются вообще весьма приближенными.

Для орудий одного и того же калибра предельное число выстрелов по различным источникам сильно колеблется. Это станет понятным, если принять во внимание разницу в орудиях, порохах, режимах и условиях стрельбы, а также если учесть индивидуальные особенности орудий и различия в методах определения предела падения боеспособности.

Обычно процесс изнашивания идет вначале очень быстро. Потом в течение довольно продолжительного времени изнаши-

вание возрастает медленно и затем снова идет чрезвычайно быстро до момента полной негодности огнестрельного оружия.

По данным многочисленных исследований были получены зависимости, определяющие предельное, до потери меткости, число выстрелов.

Такого рода зависимости будут рассмотрены ниже в связи с различными теориями износа.

§ 27. ХАРАКТЕРНЫЕ ВИДЫ ИЗНОСА КАНАЛА СТВОЛА

Изменения и разрушения в канале ствола огнестрельного оружия, связанные с продолжительной стрельбой, бывают различного характера.

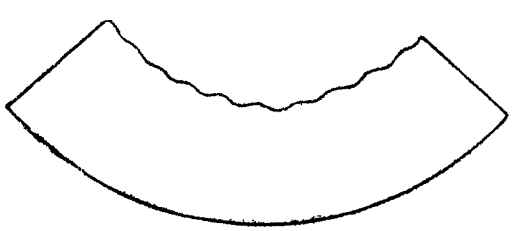
Наиболее характерными видами износа являются следующие:

1. Износ под действием механических причин представляет собой изменение диаметра канала по нарезам, главным образом по полям нарезов, а также изменение профиля нарезки.

Это истирание или сошлифовывание поверхности канала, изменяющее поперечные размеры канала, появляется уже с первых выстрелов.

Под действием реакции пояска, величина которой часто выше предела упругости орудийной стали, происходит расплющивание и смятие полей у начала нарезов.

По мере службы орудия смятие полей увеличивается, грани, стираясь, округляются, и профиль выступа нареза из прямоугольного превращается в подобие закругленной трапеции, мало напоминающей первоначальный профиль нареза.



Фиг. 53. Часть поперечного сечения орудийной трубы.

Такое изменение нарезов показано на фиг. 53.

При большом числе выстрелов поля нарезов на расстоянии 3 — 6 калибров от начала нарезов совершенно исчезают.

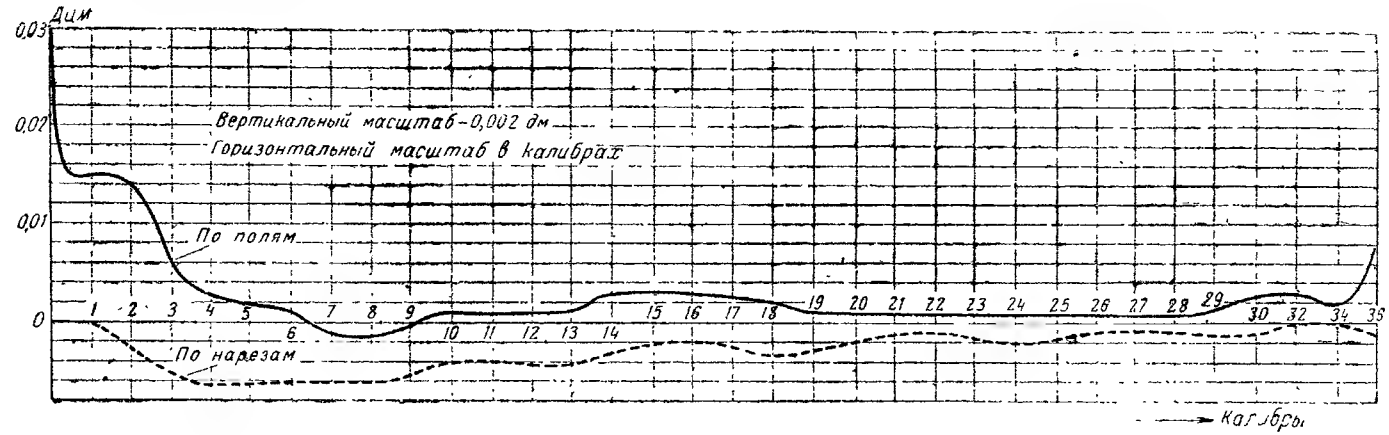
Увеличивается также и диаметр канала по нарезам.

Характер изменения диаметра канала после 10 выстрелов и после большого числа выстрелов, по данным А. Г. Матюнина, представлен на фиг. 54 и 55.

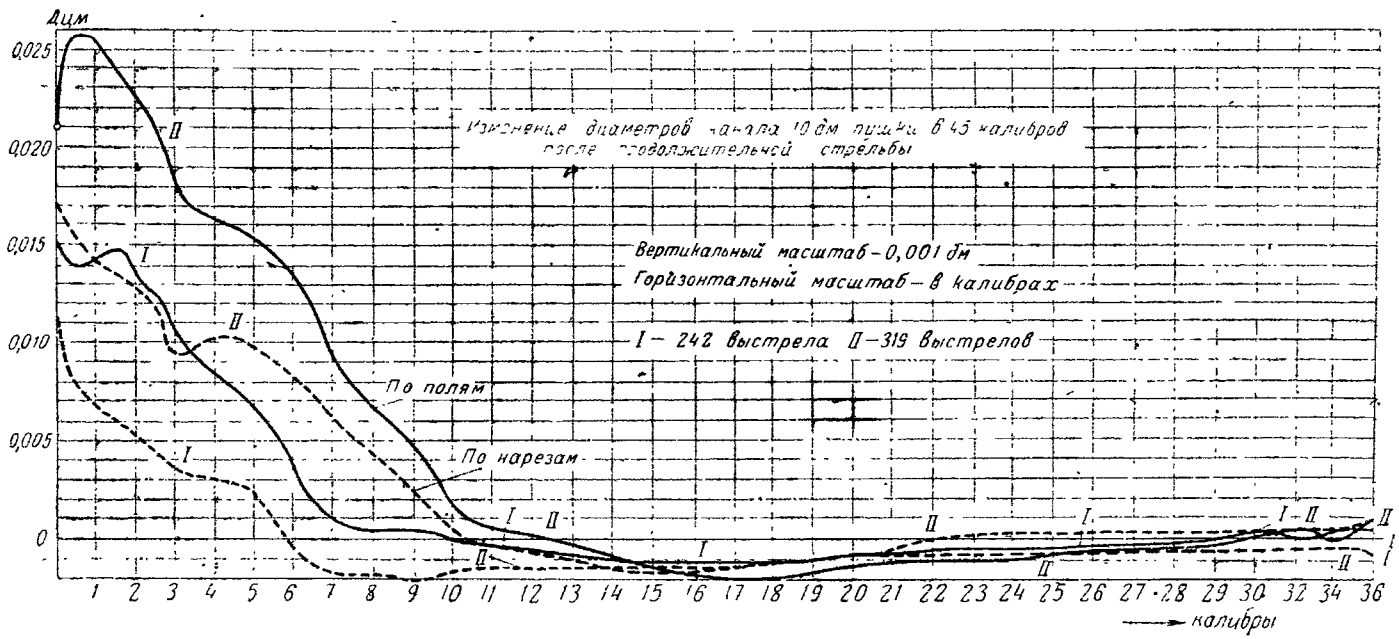
На фиг. 54 и 55 сплошной линией показано изменение диаметра канала по полям, пунктирной линией — изменение диаметра по нарезам. Обращает на себя внимание сильное изменение диаметра в начале нарезов, а также в дульной части.

Как указывалось выше, процесс изнашивания вначале обычно идет значительно быстрее.

На фиг. 56 схематически показано изменение диаметра канала 75-*мм* морской французской пушки после 750 выстрелов.



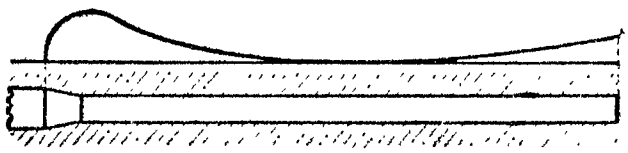
Фиг. 54. Изменение диаметра канала 10-дюймовой пушки в 45 калибров после 10 выстрелов.



Фиг. 55. Изменение диаметра канала 10-дюймовой пушки в 45 калибров после продолжительной стрельбы.
I—242 выстрела; *II*—319 выстрелов.

Характер изменения диаметра канала примерно тот же. Наибольшее изменение диаметра равно 0,4 *мм*.

Процесс износа винтовочных и пулеметных стволов имеет приблизительно такой же характер, так же увеличивается диаметр канала и уменьшается глубина нарезки, так же наибольшие изменения наблюдаются в начале нарезов, где они часто совершенно сошлифовываются. В винтовочных стволах наблюдается полное исчезновение нарезов и в дульной части ствола.



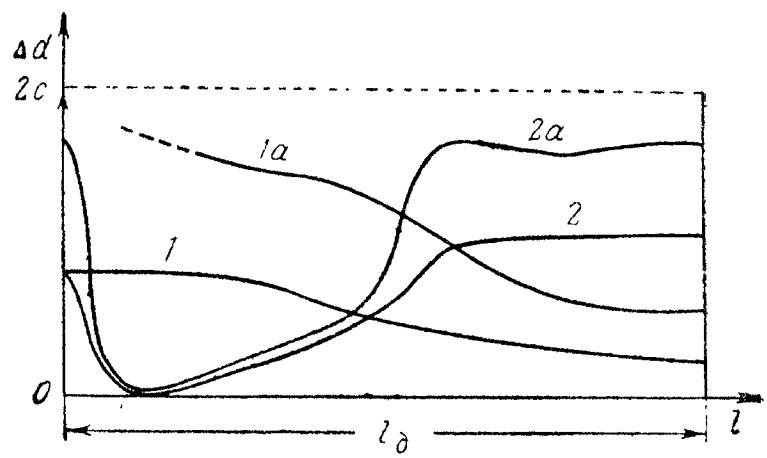
Фиг. 56.

Изменение диаметра канала магазинной винтовки показано на фиг. 57.

В винтовочных и пулеметных стволах механический износ является основной причиной разрушения канала.

2. Износ под действием физических причин, связанных с пороховыми газами, представляет собой образование на поверхности канала трещин.

Трещины обычно появляются после истирания и ослабления поверхности канала.



Фиг. 57. Δd для различных пуль.

$2c$ — удвоенная глубина нарезов.

Тупоконечные пули: *1* — после $\frac{2}{3}$ полного числа выстрелов; *1 а* — отстрел до полного износа. Остроконечная пуля: *2* — после $\frac{2}{3}$ полного числа выстрелов. *2а* — отстрел до полного износа.

Поверхность начала канала утрачивает полировку, делается матовой и покрывается правильной сеткой мелких продольных и поперечных трещинок.

Пересекающиеся трещины разрастаются в длинные продольные и оплавленные борозды. Затем они все углубляются и покрывают все большую поверхность канала, которая, таким образом, становится неровной. Глубина трещин колеблется в пределах от 0,1 до 1 — 2 *мм*.

Дальнейшее разрушение поверхности канала выражается в выкрашивании частиц металла главным образом на полях нарезов.

Явление выкрашивания металла одновременно с механическим истиранием изменяет профиль нареза и приводит, как было уже указано выше, к полному уничтожению нарезов.

Иногда это выкрашивание идет на значительную глубину, и на месте полей нарезов появляются впадины треугольного сечения.

Исчезновение нарезов в начале нарезной части канала влечет за собой увеличение каморы (при раздельном заряжании) увеличение рассеивания снарядов и пуль.

У различных систем огнестрельного оружия процесс разрушения поверхности канала протекает различно. Характер этого процесса зависит от многих случайных причин, учесть которые не всегда удается даже для орудий одного типа и калибра.

Иногда, например, до образования сетки трещин появляются продольные трещины или же появляется мелкая сыпь, делающая поверхность канала в этом месте шероховатой.

Характерный вид поверхности канала орудия после большого числа выстрелов представлен на фиг. 58 и 59. Здесь показана часть каморы и начало нарезов 3-дюймовой пушки 1899 г., выдержавшей 2480 выстрелов.

На фиг. 60 изображено поперечное сечение разрушенной поверхности канала, увеличенное в 100 раз. Здесь видно образование и распространение трещин глубиной до 0,75—0,5 *мм*. Ясно видна частичка металла, готовая выкрошиться.

Постепенный ход изменения поверхности канала орудия показан на сравнительном снимке (фиг. 63) слепков поверхности орудий.

На фиг. 61 и 62 изображено изменение поверхности канала 76-*мм* пушки образца 1902 г. после большого числа выстрелов.

Обычно поверхностные разрушения в виде трещин, борозд и прочих неровностей встречаются в следующих местах канала ствола огнестрельного оружия:

1) в каморе, причем от середины каморы к соединительному конусу они увеличиваются;

2) в соединительном конусе и в начале нарезов, где и наблюдается наиболее сильный износ до полного исчезновения нарезов, и

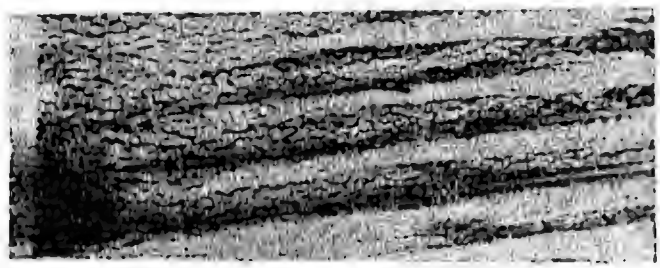
3) в дульной части.

На фиг. 64 схематически представлено расположение наиболее резких изменений поверхности канала ствола.

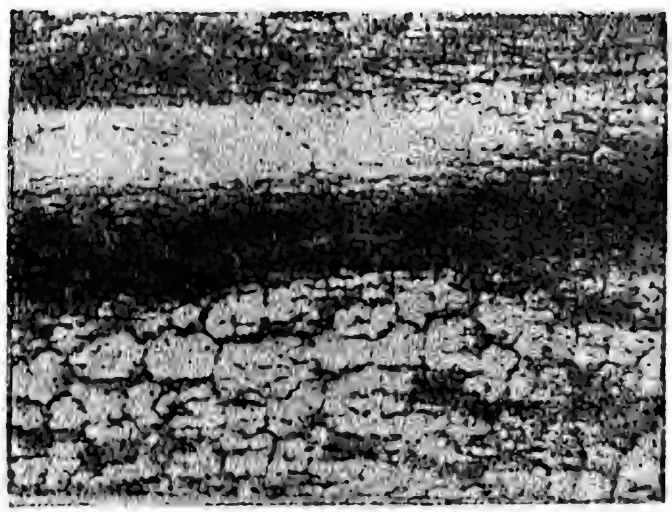
3. Эрозия канала представляет собой разрушение поверхности канала в виде вымываний металла.

В тех случаях, когда нагрев поверхностного слоя канала будет очень велик, допустим свыше 700°, предел текучести и сопротивление разрыву резко уменьшаются. Вследствие этого, как указывает проф. Швиннинг, металл уже не станет оказывать достаточного сопротивления движущимся пороховым газам и будет „вымываться".

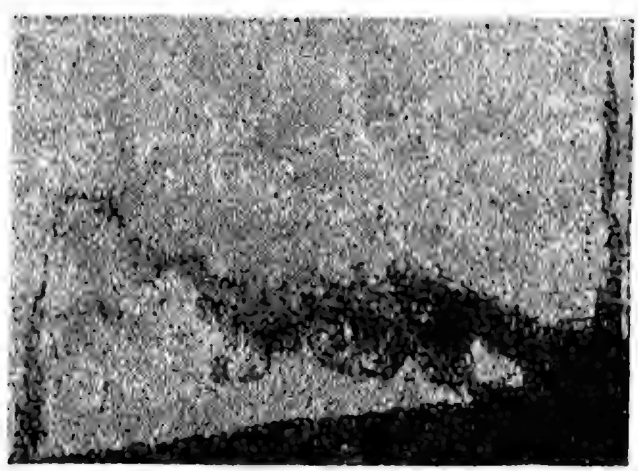
Это явление обычно встречается в тех сечениях канала ствола, где появляются вихревые движения пороховых газов, а также часто в местах образования трещин. Иногда же эрозия совершенно не связана с процессом образования сетки трещин.



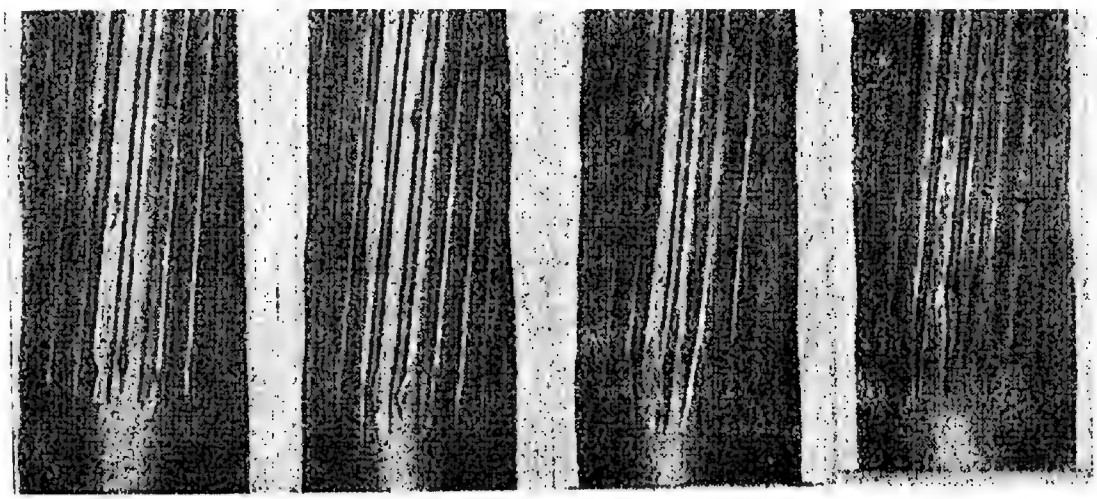
Фиг. 58.



Фиг. 59.

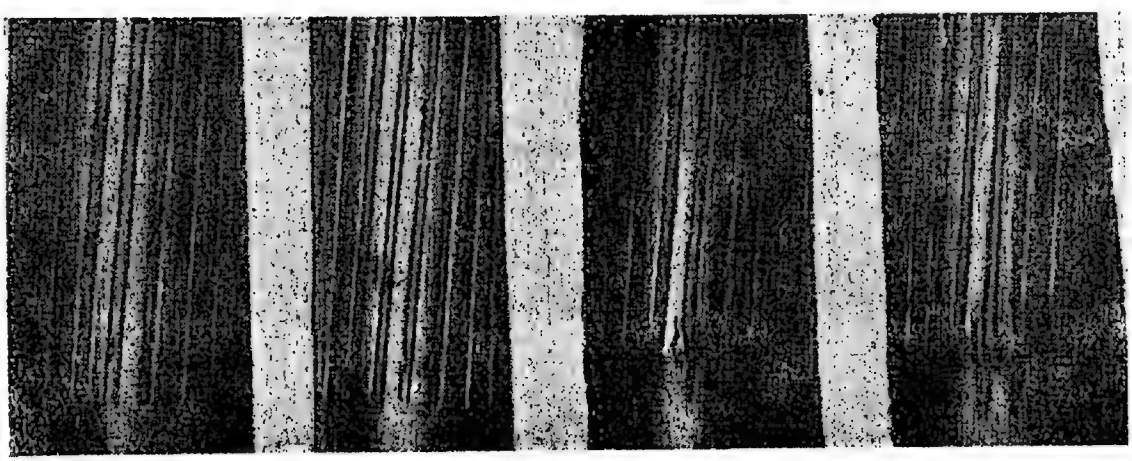


Фиг. 60.



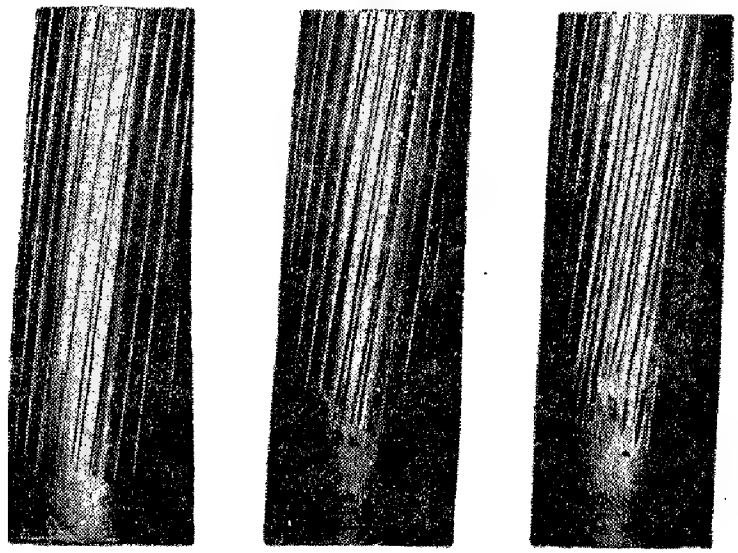
1 *2* *3* *4*

Фиг. 61. Верх канала 76,2-*мм* пушки образца 1902 г.
1—после 1000 выстрелов; *2*—2000 выстрелов, *3*—7000 выстрелов, *4*—около 10 000 выстрелов.

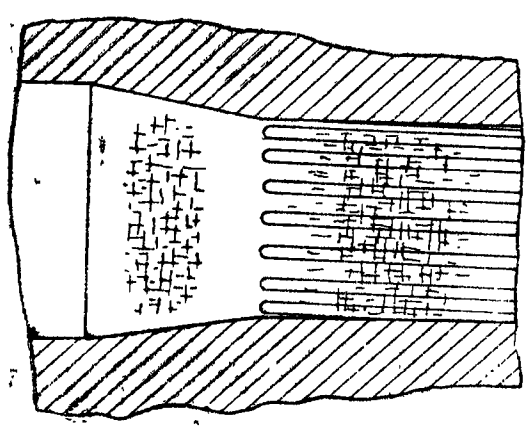


5 *6* *7* *8*

Фиг. 62. Низ канала 76,2-*мм* пушки образца 1902 г.
5—после 1000 выстрелов; *6*—2000 выстрелов; *7*—7000 выстрелов, *8*—около 10 000 выстрелов.



Фиг. 63.



Фиг. 64.

В винтовках при хорошей обтюрации явления эрозионного характера не наблюдаются, что может быть отнесено за счет отсутствия сильного термического эффекта от малого количества прорывающихся пороховых газов.

Эрозионные изменения поверхности канала ствола в орудиях встречаются только на начальном участке канала, где температура пороховых газов будет наибольшая.

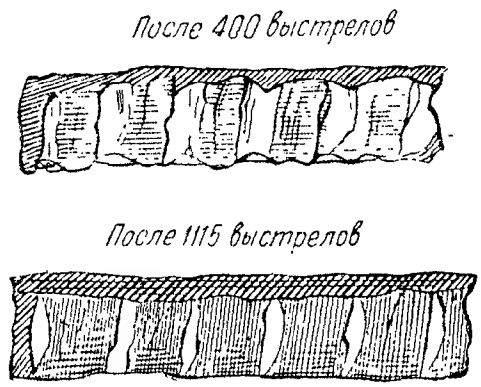
Изнашивание канала способствует появлению эрозии.

Механический износ, а также разрушения канала, связанные с появлением трещин и эрозией, протекают одновременно.

4. Окольцевание представляет собой отложения желтого цвета в определенных сечениях канала, обычно около середины канала. Положение этих сечений определяется режимом газов в стволе.

Окольцевание приводит к уменьшению диаметра канала.

Фиг. 65.



Фиг. 66.

Отложения состоят главным образом из частиц стали, оторванных от поверхности канала и унесенных пороховыми газами. В отложениях содержатся также частицы меди ведущего пояска снаряда, вследствие чего это явление часто называют „омеднением".

На фиг. 65 показаны отложения меди на снаряде перед ведущим пояском. Снаряд был выпущен из старой расстрелянной пушки.

Осаждающийся металл заполняет нарезы канала, и снаряд, не получивший ведущих выступов на пояске, а следовательно, и необходимой угловой скорости вращения после вылета будет неустойчивым на полете.

На фиг. 66 показаны ведущие пояски снарядов после большого числа выстрелов из пушек с окольцованными каналами.

В зависимости от изменения условий заряжания окольцевание изменяет свое положение в канале ствола.

Явление окольцевания у пушек протекает интенсивнее, чем у гаубиц.

§ 28. ТЕОРИИ ИЗНОСА КАНАЛА СТВОЛА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Рассмотренное в общих чертах явление постепенного разрушения поверхности канала ствола огнестрельного оружия зависит от очень большого числа факторов различной природы.

Для выработки мер, ограничивающих износ, необходимо, конечно, в первую очередь выяснить причины этого вредного явления.

Большое число различных причин износа канала и ненадежность некоторых экспериментальных данных приводят к целому ряду трудностей при оценке имеющегося материала. Этим, вероятно, объясняется существование в настоящее время большого количества различных теорий износа огнестрельного оружия.

Рассмотрим кратко наиболее известные из них.

Изменения в канале ствола объясняются Вьеллем химическим действием пороховых газов.

Он первый указал на то, что при высокой температуре, которую имеют пороховые газы при выстреле, наличие окиси углерода в продуктах разложения пороха может вызвать цементацию стенок канала. Вследствие этого, а также под действием имеющегося в продуктах разложения азота поверхностный слой становится хрупким, ломким и покрывается сеткой мелких трещин.

Разрушение канала усиливается под действием прорывающихся пороховых газов, проникающих в трещины. Последним объясняется наиболее значительный износ в начале нарезной части канала.

Те же приблизительно объяснения встречаются у Бургуэна и Ярнела, которые отмечают большую роль зазоров вокруг ведущего пояска, способствующих прорыву пороховых газов.

Фэй подтверждает возможность цементации поверхностного слоя. Кроме того, он указывает на повышение твердости в тех местах поверхностного слоя, где имеет место наклеп вследствие механических деформаций.

В работах Грациани также указывается на цементацию поверхностного слоя. Увеличение твердости он объясняет главным образом действием азота (нитриды железа).

По теории проф. Д. К. Чернова износ объясняется термическим действием пороховых газов. Проф. Д. К. Чернов считает,что высокая температура пороховых газов вследствие кратковременности выстрела успевает передаться лишь очень тонкому слою металла. Этот слой может расшириться соответственно нагреву только в одном направлении по радиусу, находясь сжатым в других направлениях. Дополнительное сжатие вызывает остающиеся деформации в поверхностном слое ствола, уже сжатом скреплением, примерно до предела упругости, в виде морщинок и бугорков.

После выстрела от притока воздуха наступит охлаждение, и поверхностный слой будет сжиматься. Глубокие же слои, не

успев еще охладиться, будут задерживать это сжатие, и поверхностный слой останется растянутым некоторое время.

Такое попеременное сжатие и расширение поверхностного слоя при наличии цементации и закалки, а также имеющего место явления наклепа, приводят к разрывам и появлению трещин. Таким образом на поверхности канала появляется сетка трещин или, как ее иногда называют, сетка разгара.

Покрытый трещинами поверхностный слой под действием прорывающихся с громадными скоростями пороховых газов постепенно выкрашивается.

Теплота как основная причина износа отмечается также Ноблем. На основании опытов с различными порохами он заключил, что поверхностный слой канала ствола орудия под действием высокой температуры пороховых газов оплавляется, вследствие чего частицы этого слоя выносятся движущимися пороховыми газами.

Максим также считает, что поверхностный слой при громадных температурах пороховых газов (около 3000°) и громадных давлениях (около 2500 *кг/см*^{2}) мгновенно оплавляется. Он также считает, что часть металла выносится пороховыми газами.

Основную роль температуры пороховых газов отмечает также Сиви в своей теории.

Сиви получил на основании своих опытов формулу для определения износа:

$$\Delta d = K\frac{\omega}{\pi d} t\delta_2^2,$$

где Δd — увеличение диаметра канала, K — некоторая постоянная, $\frac{\omega}{\pi d}$ — отношение веса заряда ω к окружности канала, t — продолжительность выстрела и δ_2 — плотность газов.

В этой формуле ясно выражено влияние времени и плотности пороховых газов.

Определение степени износа связано с необходимостью установления критерия, по которому орудие будет считаться негодным для дальнейшей службы.

Сиви определяет предел службы орудия по величине износа по полям, причем он исходит из определения запаса в диаметре ведущего пояска снаряда при расширении канала во время стрельбы [1].

Интересно отметить, что по вычислениям Сиви при каждом выстреле из 28-*см* пушки выбрасывается около 300 *г* металла.

По мнению Дж. У. Ричардса в пороховых газах имеется некоторое количество паров железа. Явление вымывания объясняется Ричардсом испарением частиц металла.

---

[1] Между прочим, как будет видно из дальнейшего, степень износа канала можно определить и по увеличению длины каморы вследствие выгорания соединительного конуса. Это значительно проще, чем обмер канала.

В последнее время Р. Г. Гривсом, Г. Г. Абрамом и С. Г. Риисом были произведены обширные опыты в манометрической бомбе. Ими изучалось действие пороховых газов, пропускаемых через каналы цилиндриков из различных сортов стали. Каналы цилиндриков имели различные сечения, причем наибольший износ, который определялся по потере в весе, наблюдался в конической и выходной части каналов.

При исследовании артиллерийских орудий ими было установлено существование наклепа поверхностного слоя канала: „... канал ствола после выстрелов характеризуется наличием отвердевшей корки, образуемой нагревом поверхностного слоя с последующим охлаждением, и сетью поверхностных трещин".

В результате опытов и исследования изношенных стволов артиллерийских орудий ими также было установлено, что износ является следствием оплавления металла и вымывания раскаленными пороховыми газами.

Особое значение поэтому приобретает точка плавления металла, которая должна быть как можно выше.

Теория проф. Д. К. Чернова получила широкое признание и легла в основу целого ряда исследований. Она была использована также и А. Г. Матюниным, исследование изнашивания орудий которого представляет большой интерес.

А. Г. Матюнин считает, что образование „разгара" канала орудий лучше всего объясняется следующим образом.

Во-первых, теорией проф. Чернова. При этом отмечается, что „всякое обстоятельство, способствующее увеличению нагрева поверхности, должно ускорить появление на ней признаков разгара". К этим обстоятельствам относятся, например, большой скат каморы, зазоры, через которые прорываются пороховые газы, увеличение веса заряда, снаряда, увеличение длины канала ствола.

Интенсивность образования сетки трещин зависит в первую очередь от механических качеств металла.

На основании имевшихся наблюдений А. Г. Матюнин заключает, что тягучая сталь „независимо от степени ее твердости должна лучше сопротивляться выгоранию, потому что она более способна выдерживать местные остающиеся деформации без разрушения и надрывов".

Кроме того, на интенсивность образования трещин сильно влияет чистота отделки поверхности канала, которая должна быть хорошо полированной, без сверлоковин, резцовин и других дефектов, и отсутствие литейных и других пороков металла.

Во-вторых, образование сетки трещин можно объяснить тем, что постепенно под действием ударов пороховых газов и реакции ведущего пояска тонкий поверхностный слой металла наклепывается. Кроме того, он несколько цементируется и закаливается. Эта корка „твердого и жесткого, мало тягучего металла" разрушается при наличии деформаций.

Самые сильные удары пороховых газов должны иметь место на скате каморы и в сечениях канала, где могут быть зазоры вокруг снаряда. Металл в этих местах будет больше наклепываться и деформироваться, что может служить объяснением появления в первую очередь именно здесь сетки разгара.

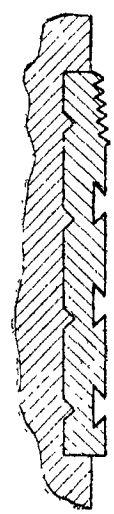
Дальнейшее развитие разгара после образования сетки происходит под термическим и механическим действием пороховых газов.

Способность металла сопротивляться значительным механическим усилиям, имеющим место в канале ствола, зависит от механических качеств металла и способа его обработки.

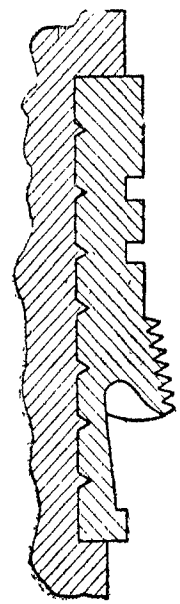
А. Г. Матюнин отмечает вредное влияние на износ примесей никеля и хрома, небольшое количество которых (не более 2%) по опытам Вьелля не сказывается на износе.

Затем указывается, что такое же отрицательное действие на износ имеет стягивание внутренней трубы ствола орудия при скреплении.

Рассмотрение влияния сорта пороха на износ, на основании опытов Вьелля, приводит к заключению, что „...для сбережения орудий следует отдать полное предпочтение пироксилиновым порохам".



Фиг. 67.



Фиг. 68.

Рекомендуемые для увеличения срока службы орудия средства разделяются на следующие категории:

а) исправляющие изношенные орудия при помощи замены внутренней трубы (ляйнирование);

б) допускающие вести стрельбу из изношенных орудий (например, устройство особых ведущих поясков у снарядов и др.);

в) замедляющие и уменьшающие износ орудий.

Сюда относятся следующие меры, уменьшающие разгар:

1. Изменение состава пороха для уменьшения нагревания стенок канала, которое может быть до некоторой степени достигнуто и изменением размеров каморы.

2. Хорошая досылка снаряда при заряжании и соответствующее устройство ведущего пояска для уменьшения прорыва пороховых газов.

Обычно передняя часть пояска делается конической, а диаметр пояска несколько больше диаметра канала по нарезам. В английской артиллерии передняя часть пояска имеет еще мелкую нарезку, как указано на фиг. 67.

Отмечается, что у патронных пушек наблюдается более сильный разгар из-за зазора между пояском и началом нарезов.

3. Различные обтюраторы и специального устройства ведущие пояски для достижения полной обтюрации.

Такой ведущий поясок изображен на фиг. 68.

К мерам, уменьшающим изнашивание под действием механических причин, относятся следующие:

4. Соответствующее изменение вида нарезки.

Прогрессивная нарезка признается бесспорно выгоднее нарезки постоянной крутизны.

Самой выгодной является нарезка смешанная, которая, как упоминалось в § 14, предлагается А. Г. Матюниным в следующем виде: начальный участок прямолинейный по производящей канала, а затем идет параболическая нарезка с участком нарезки постоянной крутизны у дульного среза.

5. Увеличение глубины нарезов канала орудия для уменьшения смятия и стирания.

6. Применение смазки канала для уменьшения прилипания к стенкам канала медных частиц, а также для предохранения канала от нагревания пороховыми газами и отчасти для обтюрации.

7. Применение снарядов с готовыми выступами.

А. Г. Матюнин указывает, что все меры кроме последней могут только до некоторой степени замедлить изнашивание. Последняя же мера является единственной для уменьшения износа и изъятия некоторых явлений, связанных с врезанием ведущего пояска.

Введением снарядов с готовыми выступами достигается целый ряд выгод:

1) устраняются наклеп полей нарезов, увеличение диаметра канала по полям и срывы или повороты ведущих поясков;

2) увеличивается меткость;

3) уменьшается омеднение и разгар канала;

4) улучшается центрирование снаряда.

Указания А. Г. Матюнина на снаряды с готовыми выступами, предложенные еще Витвортом в 70-х гг. прошлого столетия, как на единственное средство, могущее уменьшить износ орудий, являются особенно ценными, что совершенно правильно отмечено в рассматриваемой ниже работе проф. А. Ф. Головина.

По теории Шарбонье изнашивание канала объясняется механическим действием пороховых газов.

По этой теории, подтверждаемой математическим анализом, в заснарядном пространстве в массе пороховых газов непрерывно образуются волны, идущие то в сторону дна каморы, то после отражения в сторону дна снаряда.

Эти волны поддерживают в напряженном состоянии газовую струю (la veine gazeuse), которую Шарбонье сравнивает с упругим стержнем, который растягивается и проталкивает, как разжимающаяся пружина, снаряд по каналу ствола орудия.

Газовая струя действует подобно водяному потоку, который сглаживает все неровности и выступы водоворотами, образующимися при переходе в более узкое русло.

Сжатие газовой струи будет иметь место и в канале ствола орудия при переходе из каморы в нарезную часть. Вследствие вихревых движений пороховых газов в этом месте канала и наблюдаются наибольшие разрушения.

По теории Шарбонье такого же порядка явления, связанные со сжатием струи, должны иметь место у дульного среза. Последнее маловероятно, хотя и согласовывается с наблюдающимся здесь износом.

Отложения меди и стали около середины канала ствола объясняются по этой теории падением скорости частиц газовой струи в этих сечениях.

Механическое действие пороховых газов признается основной причиной износа и в работах М. Летанга.

М. Летанг показал, что износ является следствием ударов молекул пороховых газов, имеющих скорости до 6000 *м/сек*.

Кроме того, он считает, что основной причиной нагрева стволов является работа ведущего пояска. Нагрев при этом достигает 200—400° С.

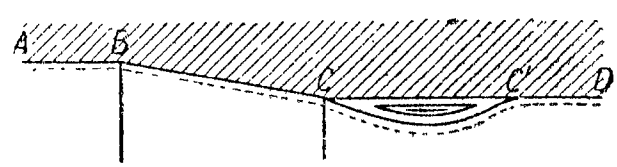
В теории Летанга подчеркивается также влияние на интенсивность износа темпа стрельбы.

Теория Шарбонье была также использована и Л. Габо, которому удалось создать математическую теорию износа, рассматривающую износ как следствие многих причин и позволяющую вычислить влияние всех основных факторов.

Это чрезвычайно интересное и всестороннее исследование заслуживает самого серьезного внимания.

Габо различает *материальный износ* и *балистический износ* артиллерийских орудий.

Исследование действия газовой струи приводит его к заключению, что причиной *материального износа* являются кольцевые вихри газовой струи (фиг. 69).



Фиг. 69.

При этом действие вихревых колец вызывается не трением, а ударами молекул о шероховатости поверхности. Вследствие этого Габо придает особое значение ударной вязкости металла, зависящей в свою очередь от состояния в данный момент структуры (связанной с составом и термической обработкой) и температуры (увеличение которой понижает сопротивление удару).

Кроме того, необходимо учесть еще и действие стрельбы на металл. Нагрев поверхностного слоя при выстреле сопровождается затем резким охлаждением при открывании затвора. Более быстрое сокращение поверхностного слоя по сравнению с выше лежащими слоями металла вызывает наклеп поверхностного слоя. Последний затем растрескивается, образуя трещины (схема Чернова). Наклеп влияет на уменьшение вязкости, отчего ускоряется износ.

Габо замечает, что наклеп иногда заменяют закалкой, которая, по его мнению, не может иметь места.

На основании полученной зависимости для температуры нагрева поверхностного слоя t от обжатия ведущего пояска:

$$t - t_0 > \frac{8}{3} p_0,$$

где t_0—температура ствола до начала обжатия ведущего пояска, p_0 -давление форсирования, он заключает, что нагрев от обжатия достаточно велик, достигая 700—1100° С.

Такого же порядка температуру нагрева можно найти и у д-ра Пиантанида (850° С).

Габо выводит зависимость:

а) Для ударной вязкости ρ_N:

$$\rho_N = \rho'_N e^{-2{,}2(1-\lambda)p_0 \frac{d}{\varepsilon}\frac{10^{-3}}{T_\rho}} e^{-k(1-\lambda)\frac{t_0}{T_\rho}} e^{-\lambda k \frac{T_0}{T_\rho}},$$

где ρ'—фиктивная ударная вязкость, k—постоянный коэфициент, T_ρ —температура, при которой металл переходит в вязкое состояние, T_0—температура горения пороха, λ—коэфициент, характеризующий металл и использование пороха, ε—толщина, на которую нагрелся металл от обжатия пояска.

б Для объема изношенного металла $d\tau$:

$$d\tau = \frac{\pi}{4}(D_0^2 - d^2)\, d(dU),$$

где D_0—диаметр ведущего пояска, $d(dU)$—величина продвижения заднего конуса каморы вследствие износа.

в) Для потери энергии заряда в коническом скате каморы изношенного ствола W_N:

$$W_N = \alpha \mu_0 \frac{\rho - 1}{\rho} \frac{\omega}{2g} v_0^2 \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2 \Phi\left(\frac{dU}{d}\right),$$

где α—некоторый постоянный коэфициент; μ_0—коэфициент потери энергии заряда, равный произведению значения этого коэфициента при резком сужении диаметра на синус двойного угла растворения конуса $2\varepsilon_0$; ρ—степень расширения; ω—вес заряда; v_0—начальная скорость, v_1—средняя скорость газовой струи; $\Phi\left(\frac{dU}{d}\right)$ — некоторая функция, не зависящая от условий заряжания и равная $\frac{W_N}{W_0}$, где W_0—потеря энергии заряда для нового ствола.

На основании найденных выражений Габо дает общую формулу закона материального износа:

$$\left(\frac{D_0^2}{d^2} - 1\right) \frac{d\left(\frac{dU}{d}\right)}{dN} = B \frac{W_N}{\rho_N d^2}, \tag{77}$$

где dN—небольшое число выстрелов после N-го выстрела; B—некоторая постоянная.

Подставляя сюда значения W_N и ρ_N и учитывая, что для определенного металла, сорта пороха и определенных условий врезания k, λ, p_0, T_ρ, T_0 постоянны, получаем:

$$\left(\frac{D_0^2}{d^2}-1\right)\frac{d\left(\frac{dU}{d}\right)}{dN}=\alpha\mu_0\frac{\rho-1}{\rho}\frac{\omega}{d^2}v_0^2\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2 e^{k(1-\lambda)\frac{t_0}{T_\rho}}\psi\left(\frac{dU}{d}\right),$$

где $\psi\left(\frac{dU}{d}\right)$ есть функция, являющаяся постоянной характеристикой используемых металла, сорта пороха и условий врезания.

Отсюда находится и число выстрелов N, отвечающее материальному износу:

$$N=\frac{\mathfrak{M}\left(\frac{dU}{d}\right)}{\mathbf{A}}e^{-\beta t_0},$$

где

$$\mathfrak{M}\left(\frac{dU}{d}\right)\equiv\frac{1}{\alpha}\int_0^{\frac{dU}{d}}\frac{d\left(\frac{dU}{d}\right)}{\psi\left(\frac{dU}{d}\right)},$$

и зависит от условий врезания,

$$\mathbf{A}\equiv\mu_0\frac{\rho-1}{\rho}\frac{\omega}{d^2\left(\frac{D_0^2}{d^2}-1\right)}\frac{v_0^2}{}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2,$$

и является показателем износа орудия[1].

Наконец,

$$\beta\equiv\frac{k(1-\lambda)}{T_\rho}.$$

Кроме того, дается зависимость, определяющая влияние темпа стрельбы на материальный износ:

$$N_{\gamma_i}=N_0 e^{-\beta(t_0)_i},$$

где индекс γ_i характеризует темп стрельбы по числу выстрелов в минуту, N_0—число выстрелов при стрельбе со слабыми темпами, после которого продвижение соединительного конуса каморы будет dU; $(t_0)_i$ — температура режима.

---

[1] Габо вводит еще абсолютный показатель износа $\mathbf{A}_0$, который не зависит от принятых условий врезания:

$$\mathbf{A}_0=\left(\frac{D_0^2}{d^2}-1\right)\mathbf{A}.$$

Габо дает также возможность найти предел упругости оптимальной орудийной стали на основании следующих соображений.

Из общей формулы Габо, выражающей закон материального износа, следует, что процесс изнашивания будет итти тем медленнее, чем больше ударная вязкость металла, при определенных температурных условиях. Отсюда можно заключить, что лучшими орудийными сталями являются мягкие стали.

Врезание ведущего пояска, являющееся одной из причин нагрева, вызывает значительное повышение упругости меди (от 10 до 30 *кг/мм*^{2}).

Во избежание раздавливания ведущим пояском полей нарезов необходимо, чтобы при температуре, до которой нагревается поверхностный слой при врезании, предел упругости стали равнялся приобретенному пределу упругости меди.

Таким образом, будем иметь:

$$E(1-mt) \geqslant \varepsilon,$$

где E—предел упругости холодной стали;
m—коэфициент пропорциональности;
t—температура;
ε—предел упругости медного пояска.

Отсюда имеем:

$$E \geqslant \frac{\varepsilon}{1-mt}.$$

Если принять, как указывалось выше, $t=700°$, при $m=0{,}0007$, найдем:

$$E \geqslant 2\varepsilon.$$

Принимая $\varepsilon \approx 30$ *кг/мм*^{2}, имеем:

$$E \geqslant 60 \text{ кг/мм}^2.$$

Балистическим износом орудия Габо называет потерю начальной скорости v_0 и падение максимального давления p_m, соответствующие материальному износу.

Последствиями же материального износа являются:

1) увеличение объема каморы dc',
2) изменение давления форсирования dp_0,
3) изменение пассивного сопротивления вдоль канала, т. е. изменение коэфициента фиктивности di.

Вследствие этого изменения начальной скорости v_0 и максимального давления p_m, вызванные материальным износом, можно выразить следующим образом:

$$\frac{dv_0}{v_0} = l_{c'}\frac{dc'}{c'} + l_{p_0}\frac{dp_0}{p_0} + l_i\frac{di}{i},$$

$$\frac{dp_m}{p_m} = m_{c'}\frac{dc'}{c'} + m_{p_0}\frac{dp_0}{p_0} + m_{l_i}\frac{di}{i},$$

где l и m—диференциальные коэфициенты.

Из этих зависимостей путем ряда преобразований получаем следующие уравнения, определяющие балистический износ:

$$(1-l_iN)\frac{dv_0}{v_0}=-\frac{\pi}{4}l_{c'}\frac{d^3}{c'}\frac{dU}{d}+(l_{p_0}+l_iL)\frac{d\overset{\circ}{\nu}_1}{\overset{\circ}{\nu}_1}-$$

$$-\left[\frac{2}{3}(l_{p_0}+l_iM)\frac{E-5{,}5}{E}\frac{d(D_0-a)}{(d-a)(1{,}1D_0-d-0{,}1a)}\frac{d(d)}{d}\right],$$

$$(1-m_iN)\frac{dp_m}{p_m}=\frac{\pi}{4}m_{c'}\frac{d^3}{c'}\frac{dU}{d}+(m_{p_0}+m_iL)\frac{d\overset{\circ}{\nu}_1}{\overset{\circ}{\nu}_1}-$$

$$-\left[\frac{2}{3}(m_{p_0}+m_iM)\frac{E-5{,}5}{E}\frac{d(D_0-a)}{(d-a)(1{,}1D_0-d-0{,}1a)}\frac{d(d)}{d}\right],$$

где $\overset{\circ}{\nu}_1$—коэфициент трения в переднем коническом скате;

E—предел упругости стали;

a—размер пояска после деформации;

$$L=\frac{\mathbf{A}_{\nu_1}}{\mathbf{A}_{\nu_1}+\mathbf{A}_{\nu_2}+\frac{qv_0^2}{2g}};$$

$$M=\frac{n_1\nu_1E\pi dHU\left(1+\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}\right)^{-2k\frac{E}{\mathfrak{P}}\frac{U}{D_0-a}\frac{\cos\beta}{bv_0^2}}\frac{\lg\left(1+\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}\right)}{\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}}}{\cos^2\beta\left(\mathbf{A}_{\nu_1}+\mathbf{A}_{\nu_2}+\frac{qv_0^2}{2g}\right)},$$

$$N\left(\frac{qv_0^2}{2g}+\mathbf{A}_{\nu_1}+\mathbf{A}_{\nu_2}\right)=-2(\mathbf{A}_{\nu_1}+\mathbf{A}_{\nu_2})+$$

$$+\left(\frac{2\rho}{d}\right)^2\frac{qv_0^2}{g}\sin\beta\left(\sin\beta+\frac{\nu_2\cos\beta}{1+\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}}\right)+$$

$$+2n_1\nu_1E\pi dH\frac{U}{\cos^2\beta}\left(1+\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}\right)^{-2k\frac{E}{\mathfrak{P}}\frac{U}{D_0-a}\frac{\cos\beta}{bv_0^2}}\left[\frac{1}{1+\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}}-\frac{\lg\left(1+\frac{bv_0^2}{\cos\beta}\right)}{\frac{bv_0^2}{\cos^2\beta}}\right]$$

$\mathbf{A}_{\nu_1}$—работа трения о поле и дно нарезов;

$\mathbf{A}_{\nu_2}$—работа трения о боевую грань;

q—вес снаряда;

n_1—число ведущих поясков;

H—ширина ведущего пояска;

$\mathfrak{P}$—временное сопротивление на продавливание;

U—скорость распространения деформаций;

$$b=K_1\lambda\frac{1}{u^2}=\frac{\delta}{\mathfrak{P}},$$

где K_1 — коэфициент, зависящий от скорости v;

λ — коэфициент, зависящий от $\frac{v}{U}$;

δ — удельная масса меди;

ν_1 и ν_2 — коэфициент трения на поле и дне нареза и на боевой грани нареза;

k — коэфициенты пропорциональности;

β — угол наклона нарезов.

Следовательно, режим скорости и давления может быть установлен, если известны $\frac{dU}{d}$ и $\frac{d(d)}{d}$, которые характеризуют изменения положения и размеров зоны форсирования, и если известно отношение $\frac{d\nu_1}{\nu_1}$, характеризующее поверхностное состояние этой зоны.

В заключение своего исследования Габо дает закон продвижения вперед конуса каморы как функцию количества выстрелов, откуда можно получить число выстрелов N_c, после которого наступает сглаживание пояска. Поясок „не будет больше вестись по нарезам". Наступает „балистическая смерть" орудийного ствола.

Закон продвижения конуса дается им следующей зависимостью:

$$\left(\frac{dU}{d}\right)_c = \frac{\frac{2\left(1-\frac{z_m}{2HhR}\right)}{\left(\frac{D_0}{d}\right)^2-1}\frac{h}{d}\frac{2c'}{\pi d^3}}{1-\frac{1-\frac{z_m}{2HhR}}{\left(\frac{D_0}{d}\right)^2-1}\frac{h}{d}},$$

где z_m — реакция боевых граней при p_m, H — общая ширина ведущего пояска, h — глубина нарезов в новом орудии, R — нагрузка, отвечающая появлению текучести меди.

К теориям, признающим главными причинами причины механического характера, относится теория Юстрова.

Юстров считает, что износ является следствием многих причин, а именно: 1) давления между выступами пояска и полями нарезов, возникающего вследствие вращательного ускорения снаряда; 2) трения, возникающего на внутренней поверхности канала при движении снаряда; 3) усилий, развивающихся в соединительном конусе при врезании полей нарезов в ведущий поясок снаряда, а затем уже 4) давления, температуры и продолжительности действия пороховых газов; 5) влияния прорыва газов и скорости стрельбы; 6) качества металла ствола и ведущего пояска и, наконец, 7) изнашивания от чистки канала.

Юстров, как и другие исследователи, признает, что высокая температура пороховых газов размягчает и оплавляет поверхностный слой металла. Но он считает, что это оплавление будет иметь место лишь в том случае, если поверхность канала предварительно ослаблена действием механических причин. Отмечается также большое влияние на износ состояния поверхности канала и ухода за ним.

На основании исследования продолжительности службы стволов огнестрельного оружия Юстров дает формулу, определяющую предельное число выстрелов, в следующем виде:

$$N = \frac{xy}{d^2} \cdot \frac{c_q v_д^2}{\lambda} \cdot \frac{\sigma_z \varepsilon}{\nu\sigma},$$

где x — коэфициент, зависящий главным образом от величины максимального давления и от природы пороха, причем при изменении давления от 1000 до 2000 *кг/см*^{2} он уменьшается от 1,25 до 0,15, а при дальнейшем увеличении давления до 2500 *кг/см*^{2} он медленно изменяется до 0,05, равняясь 0,001 при давлении в 4000 *кг/см*^{2};

y — коэфициент, зависящий от калибра (при обычных скоростях стрельбы); когда число выстрелов не превышает $\frac{441}{d^2}$ в минуту, он быстро увеличивается с ростом калибра примерно до $d=15$ *см*, а затем растет медленно;

d — калибр в *см*;

c_q — отношение веса снаряда в граммах к кубу калибра;

$v_д$ — дульная скорость;

λ — относительная длина орудия;

σ_z — допустимая нагрузка при растяжении в *кг/см*^{2} (5000);

ε — растяжение для металла орудия (15%);

σ — допустимая нагрузка при сжатии для металла ведущего пояска (2500 для меди);

ν — коэфициент трения (0,2 для меди).

Множитель $\frac{c_q v_д^2}{\lambda}$ характеризует отношение дульной энергии снаряда к емкости канала.

Множитель $\frac{\sigma_z \varepsilon}{\nu\sigma}$ учитывает механические качества металла ствола и ведущего пояска.

Так как давление боевой грани, трение на гранях при врезании ведущего пояска и изменение площади поперечного сечения ствола и зазоров, через которые прорываются пороховые газы, прямо пропорциональны d^2, то продолжительность службы будет обратно пропорциональна d^2 и может быть выражена отношением $\frac{x}{d^2}$. Влияние же изменения условий последующих выстрелов учитывается коэфициентом y в множителе $\frac{xy}{d^2}$.

Здесь же следует отметить, что по формуле Юстрова для некоторых случаев можно получить маловероятные заключения. Например, с увеличением веса заряда и плотности заряжания продолжительность службы орудия возрастает, или с увеличением дульной энергии, отнесенной к единице длины $\left(\text{член } \frac{c_q v_д^2}{\lambda}\right)$, продолжительность службы также возрастает.

Для уменьшения износа рекомендуется плавный профиль нареза, показанный на фиг. 70.

Юстров принимает за предел износа уменьшение начальной скорости снаряда на 10%.

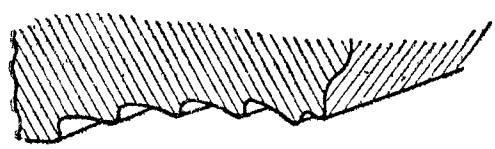
По целому ряду зависимостей, определяющих предельное число выстрелов, это число примерно обратно пропорционально квадрату калибра (Трофимов, Роне и др.).

У Юстрова число возможных выстрелов также убывает с увеличением калибра при данных качествах металла орудия и пояска, но влияние калибра сказывается несколько меньше, чем в других формулах.

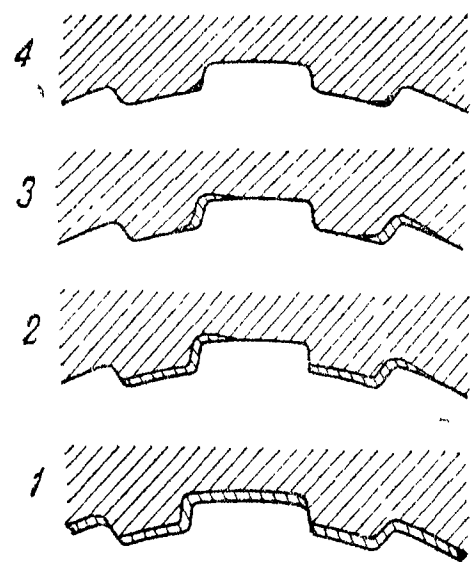
В прекрасном исследовании износа стволов артиллерийских орудий проф. А. Ф. Головина также большое внимание уделяется причинам износа механического характера.

Это исследование показало, что:

1. Радиальное давление ведущего пояска снаряда на вершины полей вызывает появление участков наклепа. При этом зоны местного наклепа совпадают с коничностью канала по полям нарезов.



Фиг. 70.



Фиг. 71. Схема распространения корочки в поперечном сечении нарезной части 76,2-*мм* пушки.

1—от начала нарезов 24 *мм*; *2*—от начала нарезов 165 *мм*; *3*—от начала нарезов 300—320 *мм*; *4*—от начала нарезов 645 *мм*.

2. Нагрев поверхностного слоя стали до температуры выше точки Ac_3 с последующим охлаждением является основным фактором в процессе образования корочки выгорания. Схема расположения корочки в поперечном сечении нарезной части канала изображена на фиг. 71.

Имеющие место условия охлаждения достаточны для образования в этой корочке мартенсита.

3. Образование трещин на поверхности канала является следствием: а) объемных изменений, связанных со структурными

превращениями в поверхностном слое (корочке), б) физической неоднородности металла внутреннего слоя вследствие наличия участков местного наклепа под полями нарезов и остаточных напряжений, имеющих наибольшие значения на границах этих участков, в) необратимости объемных изменений металла при повторном нагревании и охлаждении.

Кроме этих основных причин, развитию трещин способствуют следы машинной обработки, неоднородность стали и динамическая работа пороховых газов, прорывающихся в зазор между ведущим пояском снаряда и стенками канала и отрывающих от стенок частицы металла.

Основными факторами износа каналов стволов проф. А. Ф. Головин считает:

1. Радиальное давление ведущего пояска снаряда, величина которого больше динамического предела упругости стали.

2. Давление на боевую грань нарезов, которое также превосходит предел упругости стали.

3. Закалку тонкого поверхностного слоя (корочки), находящегося под высоким давлением ведущего пояска и пороховых газов.

Источниками нагревания этого слоя являются: а) теплопередача и трение пороховых газов, б) теплота, выделяемая вследствие работы трения ведущего пояска, и в) теплота, выделившаяся от работы деформации ведущего пояска.

4. Влияние химических факторов на процесс образования корочки выгорания (в частности, цементация ее) недостаточно выяснено.

Кроме того, несомненно, имеется механическое действие пороховых газов, разрушающее поверхность канала в местах изменения поперечного сечения канала ствола.

Для увеличения продолжительности службы орудийных стволов предлагаются следующие основные мероприятия:

1. Переход к системе снарядов с готовыми выступами (нарезным снарядам).

2. Устройство выкружек во входящих углах полей и скругление ребер полей.

3. Мероприятия по уменьшению нагрева и истирания поверхностного слоя, а именно:

а) подбор пороха с более низкой температурой горения, а также, по мере возможности, уменьшенного заряда;

б) возможно более тщательная шлифовка поверхности канала при заводском изготовлении ствола;

в) периодическая шлифовка канала ствола в процессе службы;

г) смазывание поверхности канала;

д) покрытие поверхности канала для повышения сопротивления износу слоем металла или сплава, органически связанным с поверхностью;

е) уменьшение величин нормального давления на боевую грань и радиального давления.

4. Применение сортов стали, хорошо сопротивляющихся износу.

К стали необходимо предъявлять следующие требования:

а) высокие упругие свойства и вязкость при динамическом действии сжатия, расширения и срезания;

б) малое влияние на эти качества температуры в интервале 200—400° С;

в) высокий предел усталости при действии повторно-переменных ударных нагрузок;

г) низкий коэфициент концентрации напряжений у выкружек;

д) высокое сопротивление истиранию.

Кроме того, конечно, необходима однородность орудийной стали и низкий коэфициент термического расширения.

6. В заключение отмечаются и другие мероприятия по продлению срока службы орудий, а именно: ляйнирование, соответствующий режим огня, уход за каналом, надлежащий способ заряжания, влияние веса заряда, обтюрации и т. д.

Большой интерес представляет собою одно из позднейших исследований износа орудий д-ра Альдо Редже.

В своем исследовании Редже анализирует существующие теории и приходит к заключению, учитывая также и свои работы, что процесс износа канала является результатом следующих факторов.

После первых же выстрелов образуется твердый поверхностный слой. Редже считает, что процесс образования этого слоя не связан с цементацией, а является следствием нитрирования поверхности под действием азота и аммиака. Этому благоприятствует как состав современной орудийной стали, так и температура ее при стрельбе (300—500° С).

Необычный взгляд высказывается им по поводу усиленного износа канала от нитроглицериновых порохов, который он объясняет большим содержанием азота, а не более высокой температурой взрывчатого разложения этих порохов.

Наличию азота он приписывает и оплавленный вид поверхностного слоя, основываясь на опытах по нагреву металла до высокой температуры (600° С) в присутствии азота с последующей полировкой поверхности.

Структурные изменения металла в довольно толстом слое, по мнению Редже, не являются следствием закалки, так как температура металла никогда не достигает критической точки Ac_3. В результате же механического воздействия, а именно: самоскрепления и механической обработки, получается значительная деформация кристаллов металла, т. е. наклеп.

Редже отрицает мартенситовую структуру более твердого поверхностного слоя, считая, что он имеет троостито-сорбитную структуру, более соответствующую достигаемой температуре.

Процесс образования поверхностных трещин следует уже за образованием твердого слоя.

Дальнейшее разрушение поверхности Редже объясняет механическим действием пороховых газов. Механическое действие пороховых газов, а также действие ведущего пояска снаряда являются причинами последнего этапа процесса разрушения — выкрашивания металла.

Все рассмотренные фазы процесса износа канала протекают одновременно и могут быть разделены лишь вследствие бо́льшего значения той или иной причины износа.

В заключение Редже рекомендует для уменьшения износа ряд мер.

Орудийный металл должен отвечать следующим требованиям: он не должен поддаваться действию азота, не должен давать наклепа при механических деформациях и должен обладать высоким пределом упругости и низким коэфициентом расширения.

В связи с этим он рекомендует качественные стали. Нержавеющие стали с содержанием хрома свыше 15%, с примесями никеля и молибдена обладают достаточной вязкостью и однородностью.

Далее, отмечая вредное влияние на износ самоскрепления орудий, Редже рекомендует его для орудий большого калибра, так как оно „выравнивает“ характеристики упругости ствола и дает возможность выявить внутренние пороки металла.

Необходимо определенное очертание соединительного конуса каморы и наивыгоднейшее отношение диаметров каморы и нарезной части канала.

Форма ведущего пояска и снаряда должна быть такой, при которой не будет „болтания“ снаряда в канале орудия.

Наконец, порох должен быть более „холодным“ и менее богатым азотом.

Весьма интересным и ценным является исследование износа стволов огнестрельного оружия, произведенное профессором Швиннингом и относящееся также к последнему времени.

Проф. Швиннинг очень подробно освещает все вопросы, связанные с конструкцией и материалом стволов оружия. Детально анализируются основные виды разрушений стволов: механическое сошлифовывание внутренней поверхности, процесс образования сетки трещин и эрозия.

Износ стволов стрелкового оружия и орудийных стволов рассматривается отдельно вследствие наличия некоторой разницы в процессе износа.

В результате исследования износа винтовочных и пулеметных стволов проф. Швиннинг заключает, что процесс их разрушения сводится к истиранию, которое усиливается за счет образования трещин.

Последнее связано с целым рядом других причин и в первую очередь с температурой. Поэтому износ ускоряется с увеличением темпа стрельбы, температуры пороха, а также вследствие недостаточного охлаждения ствола.

Кроме того, решающее влияние на износ имеют конструкция пули, трение, устройство нарезов ствола, характер горения пороха и, наконец, состав пороховых газов.

Приведем некоторые заключения в отношении конструкции и материала пули и стволов стрелкового оружия.

В отношении конструкции пули главным образом отмечается ведущая ее часть, тесно связанная с интенсивностью износа ствола.

Для постепенного врезания пули в нарезы канала ведущая ее часть должна быть конической, с длиной примерно около 0,35 всей длины пули.

Уменьшение длины ведущей части приводит к колебаниям пули в канале, а следовательно, к увеличению сопротивления воздуха при полете и к уменьшению меткости, а также к более интенсивному прорыву пороховых газов.

Увеличение длины ведущей части пули приводит к усилению износа вследствие возрастания трения.

Устройство донной части пули также важно и связано с обтюрацией, для чего необходима некоторая разница в диаметрах пули и канала.

Большое влияние на процесс износа канала имеет материал пули. Он должен быть достаточно прочным для обеспечения правильного ведения пули по нарезам канала и вместе с тем не должен вызывать быстрого износа канала.

У большинства современных свинцовых пуль имеется прочная оболочка обычно из листовой стали, плакированной медно-никелевым сплавом или томпаком (до 10% толщины оболочки). Такая стальная оболочка является в отношении механических свойств наилучшей.

Опыты проф. Швиннинга по исследованию сухого трения различных металлов по стали показали, что наилучшим из металлов является медь, давшая наименьшее истирание стали. Между прочим, мягкое электролитическое железо, по твердости близкое к отожженной меди, дало значительно худшие результаты[1].

Недостаточно прочный металл оболочки вызывает деформацию ее при прорыве газов, что отрицательно сказывается на меткости. Кроме того, такой мягкий материал вызывает появление значительных отложений на поверхности канала.

Устройство нарезов ствола имеет также значение.

Глубина нарезов не должна быть значительной, хотя на первый взгляд и может показаться, что большая глубина нарезов будет содействовать отдалению момента сглаживания полей. На самом деле увеличение глубины нарезов способствует ухудшению обтюрации, а следовательно, бóльшему прорыву пороховых газов и усилению износа.

---

[1] Последние исследования показали, что износ при сухом трении усиливается при наличии кислорода. В канале ствола огнестрельного оружия этот процесс окисления также имеет место.

Проф. Швиннинг отмечает, что в качестве материала для стволов стрелкового оружия обычно употребляется сталь с высоким пределом текучести 50—55 *кг/мм*^{2} и сопротивлением разрыву 70—90 *кг/мм*^{2} при удлинении в 12—15%.

В отношении износа большое значение имеет вязкость металла и его структура.

Наблюдения показывают, что в стволах стрелкового оружия эрозионные разрушения встречаются очень редко.

Итак, как уже отмечалось, основной причиной износа стволов стрелкового оружия проф. Швиннинг считает трение, связанное с другими факторами (температура и т. д.).

Что касается орудийных стволов, то здесь проф. Швиннинг считает основной причиной образование сетки трещин, вследствие чего появляется выкрашивание частиц металла и эрозия. При этом необходимо учитывать и другие причины, среди которых наибольшее значение имеет термическое действие пороховых газов и истирание поверхности канала ведущими частями снаряда.

Это заключение сделано на основании такого же детального, как и для стрелкового оружия, анализа явлений разрушения поверхности канала стволов орудий.

Произведенные металлографические исследования показали, что в местах образования трещин нет структурных изменений металла. Также не обнаружено было изменения твердости и обогащения металла азотом, имеющимся в продуктах разложения пороха.

В сечениях канала, где имела место газовая эрозия, микроскопические исследования показали изменения в поверхностном слое, металл которого имеет мартенситовую структуру. Последнее можно объяснить тем, что здесь имелось превышение критических точек стали, и при охлаждении канала после выстрела и открывания затвора поверхностный слой получил закалку.

Кроме того, иногда у мартенситового слоя наблюдалась очень тонкая, менее твердая шлакообразная пленка окисла.

Образование трещин проф. Швиннинг объясняет переменными напряжениями усталости. При этом „предел усталости (предельное напряжение цикла) значительно понижается во всех случаях, когда одновременно с приложением переменных усилий имеет место коррозионное воздействие".

Предел усталости, так же как и предел текучести, с возрастанием температуры понижается. Он снижается также при наличии надрезов на поверхности. В канале ствола такими надрезами являются стыки граней полей нарезов с доньями. Последнее обстоятельство вызывает необходимость делать плавный переход от поля ко дну нарезов.

Коррозионное действие пороховых газов подтверждается микроскопическим анализом трещин, которые имеют окисные включения. В этом отношении нитроглицериновые пороха должны сильнее разрушать поверхность канала.

В момент выстрела поверхности канала передается очень большое количество тепла. За чрезвычайно короткий промежуток времени тепло не успевает проникнуть в глубь металла (распределение температуры в толще стенки ствола было показано в § 24).

Нагревом поверхности канала вызываются некоторые напряжения в дополнение к тем, которые связаны с давлением пороховых газов. Таким образом образование сетки трещин зависит от нагрева поверхностного слоя, от величины предела текучести при высоких температурах и от коррозионного действия пороховых газов.

Сильно нагретый, размягченный поверхностный слой вымывается. Это вымывание вследствие эрозии происходит в тех сечениях канала, где имеются наибольшие вихреобразования газовых струй.

Проф. Швиннинг считает, что в местах, где имеются вихреобразования, механическое действие которых разрушает канал, усиливается теплообмен, а значит, и нагрев со всеми вытекающими отсюда явлениями.

Отмечается также, что причиной появления вихреобразований могут быть местные неровности поверхности.

Газовый поток имеет наибольшую температуру в начале нарезов канала, а не в месте наибольшего давления пороховых газов, с чем может быть связано уменьшение сетки трещин на поверхности канала и эрозия по направлению к дульному срезу.

Вихревые движения газовых струй связаны с прорывом пороховых газов, который может иметь место вследствие образования зазоров между ведущим пояском и поверхностью канала и является следствием, вообще говоря, недостаточной обтюрации.

Достижение необходимой обтюрации зависит и от степени досылки снаряда при заряжании. Вопросы обтюрации усложняются с увеличением калибра, чем отчасти объясняется усиление износа орудий крупных калибров.

При увеличении прорыва пороховых газов наблюдается возрастание сетки трещин и эрозии в начале нарезной части канала орудия.

Полная досылка снаряда при заряжании необходима и для того, чтобы избавиться от ударов пояска снаряда, разрушающих поверхность канала.

Большое влияние на процесс износа оказывают теплопроводность стали и условия охлаждения канала между выстрелами.

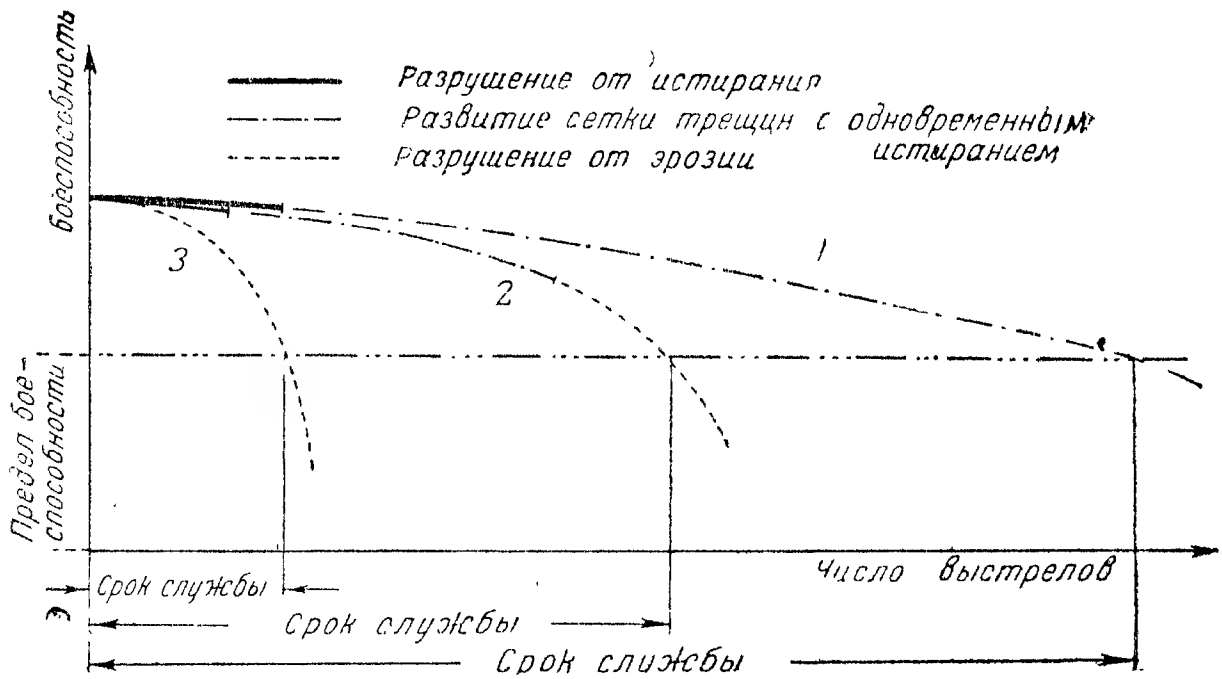
В связи с этим отмечаются преимущества легированных сталей в отношении износа.

Выше было указано на вредное влияние перегрева поверхностного слоя. Для устранения перегрева необходим отвод тепла от внутренней поверхности ствола к наружной. Указывая

на это, проф. Швиннинг считает, что на поверхностях скрепленного ствола не должно быть окислов, число таких поверхностей должно быть невелико и слои ствола должны плотно прилегать друг к другу. Все эти требования не могут быть удовлетворены при проволочном скреплении орудий, которые по имеющимся данным изнашиваются значительно быстрее.

Для уменьшения износа проф. Швиннинг предлагает прогрессивную нарезку канала с участком постоянной крутизны от начала нарезов до места наибольшего давления пороховых газов (см. § 14).

Металл орудийных стволов должен отвечать целому ряду требований. Он должен обладать большим пределом текучести,



Фиг. 72. Падение боеспособности стволов с увеличением числа выстрелов.

1 — стволы малой и средней мощности; *2* — стволы большой мощности; *3* — стволы максимальной мощности.

большим сопротивлением усталости при высоких температурах и большим сопротивлением истиранию также при высоких температурах.

Удовлетворение двум последним требованиям находится „в зависимости от способности материала к упрочнению. Поэтому материалу ствола посредством целесообразного легирования и операций нормального улучшения (для получения сорбитной структуры) должны быть приданы высокие свойства прочности при сохранении хорошей вязкости. Одностороннее повышение предела текучести путем только холодной обработки является недостаточным. Специальная сталь со структурой аустенита может дать благоприятный результат, но только при наличии достаточно высокого предела текучести".

Что касается материала ведущего пояска снаряда, то наилучшим признается медь.

Железные ведущие пояски вызывают значительно более интенсивный износ.

Очень важно обеспечить хорошее прилегание ведущих частей снаряда во избежание колебаний снаряда.

Наконец, следует отметить, что в отношении износа пироксилиновый порох имеет целый ряд преимуществ перед нитроглицериновым.

Как одну из мер увеличения срока службы орудия рекомендуют ляйнирование. Последняя мера является особенно важной для орудий большого калибра.

В заключение на фиг. 72 приводятся диаграммы, даваемые проф. Швиннингом, которые показывают изменение боеспособности огнестрельного оружия в зависимости от числа выстрелов.

На диаграммах наглядно представлен постепенный ход падения боеспособности в связи с характером и степенью износа для стволов орудий различной мощности.

Для орудий наиболее крупных калибров разрушения канала в виде истирания или образования сетки трещин почти или совершенно отсутствуют.

§ 29. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИЗНОС КАНАЛА СТВОЛА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Краткий обзор наиболее известных теорий и исследований износа показывает, что имеющийся в настоящее время большой материал еще недостаточен для объяснения некоторых явлений, связанных с износом.

В целом ряде теорий встречаются противоречивые данные. Некоторые из теорий стремятся отдать предпочтение какой-либо одной причине износа, не учитывая или совсем отбрасывая множество существующих факторов.

Вместе с тем, как видно из предыдущего параграфа, многие из причин износа тесно связаны между собой, и, вероятнее всего, износ канала ствола огнестрельного оружия является следствием целого ряда одновременно действующих причин.

Для разрешения многих неясных вопросов необходимы дальнейшие систематические наблюдения и исследования как в области балистики, так и в области металлургии и химии взрывчатых веществ.

На основании имеющихся данных можно полагать, что износ канала, являясь результатом одновременного действия многих факторов, связан с действием пороховых газов и причинами механического порядка, а также в значительной степени зависит от качеств и устройства ствола оружия и ведущих частей снаряда или пули и, наконец, зависит от режима стрельбы и ухода за каналом ствола.

Среди факторов, связанных с действием пороховых газов, одно из первых мест занимает высокая температура газов. Она является основной причиной нагревания поверхностного слоя. Этот слой наклепывается и изменяется, приобретая

твердость и хрупкость, под химическим и механическим действием пороховых газов и вследствие ударов и воздействия ведущих частей снаряда или пули.

Сильный нагрев такого слоя и последующее охлаждение после выстрела вызывают его попеременное сжатие и расширение, приводящие к появлению сетки трещин. Образование сетки трещин является одной из фаз процесса износа, следующей за образованием твердого поверхностного слоя.

При резком охлаждении поверхностного слоя может иметь место закалка, которая также должна способствовать образованию сетки трещин. На возможность закалки поверхностного слоя в условиях стрельбы имеются указания в целом ряде исследований (Чернов, Матюнин, Головин, Швиннинг и др.). Вместе с тем имеются и обратные утверждения, например в работах Габо и Редже, которые считают, что закалки поверхностного слоя быть не может. Этот спорный вопрос может быть разрешен дальнейшими исследованиями.

Также обстоит дело и с вопросом о структуре поверхностного слоя. Редже говорит, что этот слой „не хочется называть мартенситовым, как он был назван Фэем, Ноблем, Гривсом, Абрамом и Риисом, потому что никому не удалось с убедительностью доказать присутствие ясно выраженного мартенсита". Однако у многих авторов, не отмеченных Редже, в частности у Швиннинга, Головина, имеются указания на мартенситовую структуру поверхностного слоя.

Со структурными превращениями поверхностного слоя связан необратимый процесс объемных изменений, также влияющий на образование сетки трещин (Головин, Редже).

Затем, нагревание поверхностного слоя до температуры, превышающей точку плавления стали и железа, вызывает его размягчение и оплавление. Этому будет способствовать высокое давление пороховых газов, а также изменения поверхности канала под действием причин механического порядка. Оплавление поверхности канала при наличии других факторов, представляющее собой явление эрозии, приводит к „вымыванию" металла.

Следует отметить еще одно отрицательное влияние на износ высокой температуры пороховых газов. У нагретого металла будет уменьшаться ударная вязкость, будет падать предел усталости и сопротивление металла истиранию.

По вопросу, поднятому в исследовании Дж. Ричардса, об испарении железа, с которым связывается вымывание металла, достаточных данных не имеется.

С высоким давлением пороховых газов связаны силы, возникающие в соединительном конусе и на гранях нарезов при врезании и движении снаряда или пули в канале оружия.

Эти силы, а также удары ведущих частей снаряда или пули вместе с ударами частиц пороховых газов и, как было указано

выше, термическим эффектом, будут вызывать наклеп и изменения поверхностного слоя, способствующие образованию сетки трещин.

Одной из причин процесса образования трещин являются и переменные напряжения усталости в поверхностном слое металла, связанные с давлением пороховых газов.

Отмеченные здесь силы на гранях нарезов производят истирание и сошлифовывание граней нарезов. Интенсивность этого процесса возрастает за счет образования сетки трещин.

Плотность пороховых газов при имеющих место громадных давлениях настолько велика, что газы, по выражению проф. Д. К. Чернова, „можно назвать огненной жидкостью". Эта раскаленная жидкость быстро нагревает поверхностный слой канала до высокой температуры.

Химический состав пороховых газов несомненно также должен оказывать влияние на изменение поверхности канала, особенно принимая во внимание их высокую температуру.

Как известно, в состав продуктов разложения обычных пироксилиновых порохов входят следующие газы: окись углерода CO, азот N, водород H_2, углекислый газ CO_2, водяные пары H_2O и небольшое количество метана CH_4 и аммиака NH_3.

Нагретые до высокой температуры CO_2 и H_2O окисляют поверхностный слой металла, что подтверждено микроанализом.

Коррозионное действие пороховых газов при наличии переменных усилий, появляющихся в поверхностном слое металла, будет снижать предел усталости.

Имеют значение и наличие в продуктах разложения пороха CO и CH_4. Под действием этих газов поверхностный слой может, вообще говоря, цементироваться.

Цементация должна придавать поверхностному слою легкоплавкость и в сочетании с другими факторами, например могущей иметь место закалкой, сообщит этому слою бо́льшую хрупкость.

Но следует заметить, что несмотря на указания на цементацию поверхностного слоя в целом ряде исследований (Вьелль, Фэй, Грациани, Чернов, Матюнин, Яковлев и др.) вопрос этот является спорным. Проф. А. Ф. Головин в своем исследовании указывает, что вопрос о влиянии химических факторов на образование корочки, „в частности, возможность ее цементации углеродом представляется наименее выясненным". Редже совершенно определенно высказывается против возможности цементации, замечая, что имеющие место „температура, природа газа и скорость явления не позволяют допустить, что здесь имела место настоящая цементация"; это доказывается и тем, что ни разу нигде не удалось обнаружить в сильно изношенных орудиях следов цементита. При этом он ссылается на заключение проф. Джолитти: „при температуре ниже 700° или, точнее, 780° ни-

какая настоящая цементация не может иметь места, а только, пожалуй, науглероживание, так как с охлаждением при надлежащей температуре получается железо-альфа, но никак не свободный цементит". Гривс, Абрам и Риис также высказываются против возможности цементации. Такое же отрицание возможности цементации находим и у проф. И. А. Крылова.

Вопрос этот может быть разрешен только путем дальнейших исследований.

Также не совсем ясен вопрос с влиянием азота на физико-химические изменения в металле.

Известно, что при температуре около 1000° железо поглощает азот. Образующийся твердый раствор обладает большой хрупкостью.

Повышение хрупкости и твердости поверхностного слоя вполне возможно и вследствие нитрирования поверхности канала под действием имеющихся в пороховых газах N и NH_3. На это имеются указания в работах Уйлера, Фэя и Редже. Последний придает особенно большое значение азоту и аммиаку в процессе изменения поверхности канала. Редже подчеркивает, что нитрированию, требующему меньшее время, чем цементация, способствуют температурные условия.

В работе Грациани, как уже отмечалось выше, также указывается на основную роль азота в процессе образования твердого поверхностного слоя, а также на образование нитридов железа. Последнему по заключению Редже способствует состав современных орудийных сталей.

Существует и обратная точка зрения, отвергающая возможность нитрирования и решительно высказанная Гривсом, Абрамом и Риисом. В исследовании Швиннинга также отмечается на основании металлографического анализа отсутствие в местах образования трещин обогащения металла азотом.

Таким образом и этот вопрос пока еще не разрешен.

В канале ствола орудия может иметь место и явление окклюзии, представляющее собой поглощение металлом под большим давлением значительных количеств газа.

Расширение поглощенных газов и обратный выход их при уменьшении давления могут разрыхлять металл, способствуя тем самым разрушению канала.

В этом отношении следует отметить водород.

Относительно разъедания стали водородом интересно привести заключение Бриджмена, сделанное им на основании опытов: „Водород вгоняется давлением во все поры стального цилиндра. Кусок стали, подвергнутый таким образом действию водорода, постепенно им пронизывается, в результате чего получается значительная потеря прочности".

При этом Бриджмен отмечает грубозернистую стуктуру стали, разъеденной действием водорода.

Отметим, что водород при температуре около 1000° С также может дать твердый раствор с железом.

К основным факторам износа относится и механическое действие пороховых газов.

По Шарбонье, в местах изменения поперечного сечения канала ствола оружия, где происходит сжатие струи пороховых газов, вихревые движения разрушают поверхностный слой.

Следует признать согласно утверждениям Габо, что разрушение поверхности в зоне вихревых движений производится не трением, а непрерывными ударами газовых молекул о шероховатости поверхности.

В целом ряде работ (Матюнин, Летанг и др.) также отмечаются разрушения, наклеп и деформации поверхностного слоя под действием ударов газовых молекул.

Вихревые движения пороховых газов усиливают теплообмен (Шарбонье, Швиннинг), а следовательно, и нагревание поверхностного слоя, что в свою очередь влечет за собой некоторые рассмотренные выше явления, содействующие износу.

После образования сетки трещин пороховые газы, движущиеся с громадными скоростями, увлекают с собой частицы металла.

Проникающие в трещины газы производят дальнейшее разрушение поверхности и выкрашивание нарезов. Значительные разрушения вызываются прорывающимися через зазоры пороховыми газами.

В случаях очень сильного нагрева поверхностного слоя поток пороховых газов „вымывает" размягченный металл, неспособный уже оказывать сопротивление. Как было отмечено выше, вымывание вследствие эрозии встречается на начальном участке нарезов в местах вихреобразований.

Несомненное влияние на процесс износа канала имеет и продолжительность действия пороховых газов.

С временем действия пороховых газов связан до некоторой степени более интенсивный износ длинных пушек.

Все перечисленные выше факторы, связанные с действием пороховых газов, будут, естественно, находиться в зависимости от сорта пороха и веса заряда.

Большинство исследователей износа на основании имеющегося материала совершенно определенно высказывается за применение пироксилиновых порохов, имеющих ряд преимуществ по сравнению с нитроглицериновыми.

Во-первых, нитроглицериновые пороха имеют более высокую температуру взрывчатого разложения, которая вызывает и более сильный нагрев поверхности канала, отрицательное влияние которого было выяснено.

Температура взрывчатого разложения нитроглицериновых порохов изменяется от 2900 до 3150° С, тогда как у пироксилиновых температура колеблется в пределах от 2500 до 2700° С.

Во-вторых, вполне вероятно влияние на изменения поверхностного слоя азота, которым более богаты пороховые газы, полученные вследствие разложения нитроглицериновых порохов.

Наконец, продукты разложения нитроглицериновых порохов могут иметь более интенсивное коррозионное действие, что также, как отмечалось выше, способствует износу.

Переходя к факторам механического порядка, в первую очередь следует указать на нормальную реакцию боевой грани. Она несомненно является одной из главных причин износа как в начале процесса при образовании твердого поверхностного слоя, так и после образования сетки трещин на поверхности канала.

Кроме этой реакции, большое значение имеет и реакция пояска, также участвующая в процессе образования твердого поверхностного слоя и разрушения поверхности после образования сетки трещин. Особенно большую роль в разрушении поверхности канала играет реакция пояска в период врезания ведущего пояска или ведущей части пули в нарезы канала.

С нормальной реакцией боевой грани нареза и реакцией пояска связано трение о поверхность канала ведущих частей снаряда или пули, истирающее и сошлифовывающее поверхность канала.

Вследствие трения и деформаций ведущих частей снаряда или пули имеет место и дополнительный нагрев поверхности канала, особенно сильный в период врезания ведущих частей, вредное влияние которого неоднократно отмечалось.

Под влиянием главным образом этих, так сказать, механических причин происходит наклеп поверхностного слоя, в процессе образования которого, как уже известно, участвуют тоже удары частиц порооховых газов, а также растяжения и сжатия под действием попеременного нагрева и охлаждения.

Затем очень большое значение имеет качество металла ствола оружия.

Металл ствола оружия должен обладать высоким пределом упругости, высоким пределом текучести, высоким пределом усталости, на которые не влияла бы высокая температура. Металл должен быть достаточно вязким, что особенно относится к ударной вязкости. Он должен обладать высоким сопротивлением истиранию при высоких температурах. Необходим низкий коэфициент термического расширения и достаточная теплопроводность металла. Металл должен иметь высокую точку плавления. Также имеет значение неоднородность металла, влияющая отрицательно на износ, и содержание примесей.

Хорошо должны сопротивляться износу легированные стали (Швиннинг). Нержавеющие стали с примесями никеля, хрома и молибдена также должны хорошо сопротивляться (Редже). При этом металл должен обладать способностью мало реагировать на действие азота и не должен наклепываться под действием механических деформаций.

Технологический процесс изготовления стволов также играет роль. Литейные и прочие пороки должны отсутствовать.

Существенное значение имеет, естественно, соответствующая термическая обработка металла, которая должна обеспечить перечисленные выше качества в сочетании с прочностью металла в отношении износа.

Кроме того, играет немалую роль и холодная обработка ствола.

Неровности поверхности канала ствола вызывают появление вихреобразований, о вредном действии которых говорилось выше. Необходима поэтому чистота отделки поверхности, должны отсутствовать следы обработки. Если судить по результатам работ инж. П. Ф. Юлина, то на износ должны оказывать влияние не только качество обработки, но и способ обработки, с которым связано направление следов обработки и пр.

Также играет роль и качество металла ведущего пояска снаряда или оболочки пули.

Наилучшим металлом для изготовления ведущих поясков снарядов является медь, обладающая достаточной прочностью и пластичностью. Что касается пуль, то для оболочки пуль хорошим материалом является листовая сталь, плакированная медноникелевым сплавом или томпаком.

Рациональное устройство ствола также способствует уменьшению износа.

В первую очередь соответствующие формы и очертания должны иметь каморы и начальная часть канала. Большое значение имеет величина угла наклона соединительного конуса, который должен быть незначительным для облегчения врезания.

Имеет значение также длина канала орудия и способ его скрепления. Последнее связано как с теплопроводностью, так и с тем, что стягивание труб способствует разрушению поверхности канала.

В отношении характера нарезки, как уже указывалось выше, вопрос не имеет окончательного решения.

Полагаю, что нарезка смешанной крутизны, состоящая из комбинации участков постоянной и прогрессивной крутизны, может оказать существенное влияние на продолжительность службы орудия. Профиль нареза должен быть плавным. Необходимы выкружки и отсутствие „надрезов“. Устройство нарезов должно обеспечивать хорошую обтюрацию во избежание прорывов пороховых газов.

В связи с этим стоит вопрос о глубине нарезов. Для обеспечения надлежащей обтюрации нарезы должны иметь небольшую глубину, тогда как со стороны увеличения сопротивления смятию и стиранию нарезы желательно иметь более глубокими.

Также имеет большое значение устройство снаряда и ведущего пояска. Кроме необходимой прочности, обеспечивающей требуемую угловую скорость вращения снаряда, и легкости врезания, устройство ведущего пояска должно давать

надежную обтюрацию. Наличие зазоров между пояском и стенками канала будет вызывать прорыв пороховых газов. В этом отношении могут быть полезны специальные обтюрирующие приспособления.

Ведущие части снаряда должны плотно прилегать к поверхности канала во избежание появления колебаний и болтания снаряда в канале орудия. Последнее имеет особенно большое значение при больших весах снарядов.

Сказанное в отношении ведущих поясков снарядов относится также и к устройству пули, ведущая часть которой для обеспечения вращения, обтюрации и правильного движения в канале ствола стрелкового оружия должна иметь соответствующие размеры и форму.

Затем влияние на износ оказывает также способ заряжания. В тех случаях, когда имеется унитарный патрон, неизбежны удары и нежелательное воздействие пороховых газов на начало нарезов в первые моменты движения снаряда. При раздельном заряжании важно досылать снаряд до упора в соединительный конус каморы для предохранения конуса от ударов и обеспечения лучшей обтюрации.

Необходим соответствующий уход за каналом, содержание его поверхности в чистоте. Следует иметь в виду, что излишне частая чистка в некоторых случаях может привести к усилению износа.

Интенсивность износа также можно уменьшить с помощью смазки, предохраняющей поверхности канала от непосредственного влияния пороховых газов. Проф. А. Ф. Головин в своем исследовании износа стволов рекомендует покрывать поверхность специальным металлическим слоем.

Наконец, режим стрельбы, связанный с целым рядом рассмотренных факторов, для уменьшения интенсивности износа не должен вызывать значительного нагрева огнестрельного оружия. Здесь уместно отметить полезное влияние соответствующего охлаждения ствола.

§ 30. МЕРЫ БОРЬБЫ С ИЗНОСОМ КАНАЛА СТВОЛА

Из предыдущего следует, что износ канала ствола огнестрельного оружия представляет собой совершенно неизбежный процесс.

Вместе с тем, имея представление о причинах и ходе процесса износа, можно его замедлить и продлить срок службы оружия.

В соответствии с рассмотренными факторами, влияющими на износ, можно указать на следующие меры борьбы с износом:

1. Выбор для стволов огнестрельного оружия хорошо сопротивляющегося износу материала, который должен удовлетворять указанным выше требованиям.

2. Соответствующая термическая и тщательная холодная обработка ствола.

3. Выбор соответствующего скрепления орудия, устройства каморы и конуса, а также выбор наивыгоднейшего профиля и крутизны нарезки.

4. Выбор прочного и пластичного металла для ведущего пояска и оболочки пули.

5. Выбор надлежащих размеров и специального устройства ведущих частей снаряда и пули, обеспечивающих надежную обтюрацию и уменьшение величины возникающих усилий.

Здесь следует указать, что несомненно одной из самых радикальных мер, уменьшающих износ канала, является применение системы снарядов, имеющих готовые выступы.

6. Подбор пороха с более низкой температурой взрывчатого разложения, продукты разложения которого были бы менее богаты азотом и имели бы более слабое коррозионное действие.

7. Выбор условий заряжания, обеспечивающих более низкую величину максимального давления в канале ствола.

8. Смазка поверхности канала для предохранения его от непосредственного воздействия пороховых газов.

9. Охлаждение канала ствола.

10. Соответствующий способ заряжания и полная досылка снаряда при заряжании.

11. Периодический осмотр канала, прочистка и промывка его.

Слишком частая чистка, как указывалось выше, может оказать вредное влияние.

Проф. А. Ф. Головин рекомендует периодическую прошлифовку канала.

12. В каждом отдельном случае должен быть выбран соответствующий режим стрельбы.

13. Для устранения окольцевания следует периодически применять стрельбы уменьшенным зарядом, а также прибавлять к заряду особые составы (свинцовооловянные сплавы).

Наконец, одной из мер, увеличивающих срок службы орудий в случае сильно изношенного канала, является расточка канала и вставка в него тонкой трубы, называемой ляйнером.

ГЛАВА IV

УЧЕТ РАБОТ, ПРОИЗВОДИМЫХ ПОРОХОВЫМИ ГАЗАМИ

§ 31. КОЭФИЦИЕНТ ФИКТИВНОСТИ φ

Общая величина учитываемых работ, производимых пороховыми газами, необходимая для решения основной задачи внутренней балистики, определится как сумма всех работ, рассмотренных выше:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5.$$

Работа форсирования не вводится в эту сумму. Явление форсирования учитывается введением в основные зависимости давления форсирования p_0. Всеми прочими работами, как уже

указывалось, обычно пренебрегают вследствие их малости или же вследствие отсутствия достаточного опытного материала.

Если в последнюю формулу подставить полученные ранее выражения отдельных работ, то будем иметь:

$$\mathbf{A}=\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_1\mu\operatorname{tg}^2\beta+\mathbf{A}_1\mu\nu\operatorname{tg}\beta+\mathbf{A}_1\eta\frac{\omega}{q}+\mathbf{A}_1\frac{q+2\theta\omega}{Q_0}=$$

$$=\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_1\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)+\mathbf{A}_1\left(\eta\frac{\omega}{q}+\frac{q}{Q_0}+2\theta\frac{\omega}{Q_0}\right),$$

или, вынося за скобки $\mathbf{A}_1$, найдем:

$$\mathbf{A}=\mathbf{A}_1\left[\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)+\eta\frac{\omega}{q}\left(1+2\frac{\theta}{\eta}\frac{q}{Q_0}\right)\right]. \tag{78}$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, представляет собою коэфициент фиктивности φ, учитывающий второстепенные работы,

$$\mathbf{A}=\varphi\frac{qv^2}{2g}=\varphi\mathbf{A}_1,$$

где

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)+\eta\frac{\omega}{q}\left(1+2\frac{\theta}{\eta}\frac{q}{Q_0}\right).$$

Подставляя сюда значения постоянных коэфициентов η, θ и ν, получим формулу для вычисления φ в следующем виде:

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right). \tag{79}$$

Таким образом работы, производимые пороховыми газами, учитываются при помощи замены действительной массы снаряда $\frac{q}{g}$ фиктивной массой $\frac{\varphi q}{g}$.

Величина коэфициента фиктивности, а следовательно и всей учитываемой работы изменится, если рассматривать абсолютное движение снаряда.

Получим выражение для коэфициента фиктивности в этом случае.

Рассмотренные выше работы на вращательное движение снаряда $\mathbf{A}_2$ и на трение о боевую грань $\mathbf{A}_3$ связаны с наличием нарезов в канале орудия.

В § 12 было указано, что из выражения суммы работ $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$ и $\mathbf{A}_3$ может быть получен коэфициент $\varphi_н$, учитывающий влияние нарезов

$$\mathbf{A}_{1,\,2,\,3}=\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3=\mathbf{A}_1[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]=\varphi_н\mathbf{A}_1,$$

где

$$\varphi_н=1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu). \tag{80}$$

Если для работы A_3 взять формулу 34, то выражение коэфициента фиктивности $\varphi_н$ примет вид, приведенный в § 12.

$$\varphi_н = 1 + \mu_1 \operatorname{tg}\beta \frac{\operatorname{tg}\beta + \nu}{1 - \nu \operatorname{tg}\beta}.$$

Таким образом, отмеченное влияние нарезов может быть учтено введением вместо массы снаряда $\frac{q}{g}$ фиктивной массы снаряда $\frac{\varphi_н q}{g}$.

Для получения же всей величины работы, производимой пороховыми газами, следует еще учесть работу на поступательное движение продуктов взрывчатого разложения пороха и заряда, а также работу на откат орудия.

Выражение для работы A_4 в § 18 было получено без учета влияния нарезов, и, следовательно, для учета этого влияния придется в формулу 49, определяющую A_4, подставить массу $\frac{\varphi_н q}{g}$ вместо массы $\frac{\varphi q}{g}$.

Произведя эту замену, получим:

$$A_4 = \frac{\varphi_н q v^2}{g} \eta \frac{\omega}{q}.$$

Если орудие неподвижно, то полная работа будет равна сумме

$$A_{1,2,3} + A_4 = \frac{\varphi_н q v^2}{2g} + \frac{\varphi_н q v^2}{2g} \eta \frac{\omega}{q} = \left(1 + \eta \frac{\omega}{q}\right) \frac{\varphi_н q}{2g} v^2.$$

Обозначая в последнем выражении

$$\frac{q_1}{g} = \left(1 + \eta \frac{\omega}{q}\right) \frac{\varphi_н q}{g}, \tag{81}$$

будем иметь:

$$A_{1,2,3,4} = \frac{q_1 v^2}{2g}.$$

Для неподвижного орудия имеем:

$$v = v_a,$$

где v_a — по предыдущему, скорость снаряда в абсолютном движении.

Следовательно,

$$A_{1,2,3,4} = \frac{q_1 v_a^2}{2g}.$$

Если же орудие имеет откат, то полная работа будет равна:

$$A = A_{1,2,3,4} + A_5 = \frac{q_1 v_a^2}{2g} + \frac{Q_0 V_0^2}{2g}, \tag{82}$$

где V_0 — скорость отката орудия.

Скорость отката V_0 может быть определена на основании закона сохранения количеств движения из уравнения:

$$\frac{Q_0 V_0}{g} = \frac{q_1 v_a}{g},$$

если всю систему представлять состоящей из снаряда с массой $\frac{q_1}{g}$ и орудия с массой $\frac{Q_0}{g}$.

Подставляя полученное отсюда выражение для V_0

$$V_0 = \frac{q_1}{Q_0} v_a \tag{83}$$

в уравнение 82, найдем:

$$A = \frac{q_1 v_a^2}{2g} + \frac{Q_0}{2g} \frac{q_1^2}{Q_0^2} v_a^2,$$

или

$$A = \frac{q_1 v_a^2}{2g} \left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right). \tag{84}$$

Подставив сюда значение $\frac{q_1}{g}$ из 81 и принимая во внимание выражение 80 для $\varphi_н$, будем иметь выражение работы, производимой пороховыми газами, в следующем виде:

$$A = \left\{\left(1 + \eta \frac{\omega}{q}\right)\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)[1 + \mu \operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu)]\right\} \frac{q v_a^2}{2g}. \tag{85}$$

Отсюда получается выражение для коэфициента фиктивности φ_a в случае рассмотрения абсолютной скорости снаряда:

$$\varphi_a = \left(1 + \eta \frac{\omega}{q}\right)\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)[1 + \mu \operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu)]. \tag{86}$$

Полученный коэфициент фиктивности φ_a должен быть, вообще говоря, больше коэфициента фиктивности φ.

Действительно, исходя из того, что общая величина работы не изменится от того, рассматривается скорость абсолютного или относительного движения, можно написать, что

$$A = \frac{\varphi q v^2}{2g} = \frac{\varphi_a q v_a^2}{2g}.$$

А так как известно, что

$$v = v_a + V_0$$

и, следовательно,

$$v > v_a,$$

из равенства работы в абсолютном и относительном движении получим:

$$\varphi < \varphi_a,$$

Коэфициенты φ и φ_a будут равны в случае неподвижного орудия, когда

$$v = v_a,$$

Следует отметить, что практически, как показывают нижеприведенные вычисления, произведенные по различным формулам, разница между величинами φ и φ_a получается настолько незначительной, что ею можно совершенно спокойно пренебречь и вычислять φ по формулам, более удобным для вычисления (например, формула 79).

Для коэфициента фиктивности φ проф. Кранц дает выражение, полученное из равенства

$$A = \frac{\omega q v^2}{2g} = \frac{q_1 v_a^2}{2g}\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right).$$

Заменяя относительную скорость v уравнением

$$v = v_a + V_0 = v_a\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right),$$

получим:

$$A = \frac{\omega q}{2g} v_a^2\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)^2 = \frac{q_1 v_a^2}{2g}\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right),$$

откуда находим:

(87)
$$\varphi = \frac{q_1}{q\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)},$$

Из других формул, определяющих величину коэфициента фиктивности φ, отметим формулу, даваемую проф. Д. А. Вентцелем.

Она получается из следующего уравнения для учитываемой работы, производимой пороховыми газами:

$$\frac{\omega q}{2g} v^2 = \left[1 + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q(1+\nabla)\chi}\right]\frac{1+\nabla}{\chi}\frac{q}{2g} v^2,$$

где, как и в § 9,

$$\chi = 1 + \frac{V_0}{v_a} = 1 + \frac{q}{Q_0}$$

и

$$\nabla = \mu\chi \operatorname{tg}\beta \frac{\operatorname{tg}\beta + \nu}{1 - \nu \operatorname{tg}\beta},$$

и для коэфициента φ имеем:

$$\varphi = \left[1 + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q(1+\nabla)\chi}\right]\frac{1+\nabla}{\chi} = \frac{1 + \nabla + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\frac{1}{\chi}}{\chi}.$$

Если в последнем выражении для φ произвести соответствующие подстановки, то можно придать ему следующий вид:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{q}{Q_0}}\left[1 + \mu\chi \operatorname{tg}\beta \frac{\operatorname{tg}\beta + \nu}{1 - \nu \operatorname{tg}\beta} + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\frac{1}{1 + \frac{q}{Q_0}}\right]$$

или

$$\varphi = \frac{Q_0}{Q_0 + q}\left[1 + \mu\chi \operatorname{tg}\beta \frac{\operatorname{tg}\beta + \nu}{1 - \nu \operatorname{tg}\beta} + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\frac{Q_0}{(Q_0 + q)}\right].$$

Укажем еще на формулу инж. Ф. Ф. Лендера, получаемую из выражения полной работы пороховых газов:

$$A=\left\{\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)\left[1+\eta\left(\frac{\omega}{q}+\frac{\omega}{Q_0}\right)-\frac{\omega q}{Q_0(Q_0+q)}\right]\right\}\frac{qv^2}{2g},$$

в следующем виде:

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)\left[1+\eta\left(\frac{\omega}{q}+\frac{\omega}{Q_0}\right)-\frac{\omega q}{Q_0(Q_0+q)}\right].$$

Как видно, эта формула незначительно отличается от вышеприведенных формул.

Шарбонье дает несколько иную формулу для работы пороховых газов:

$$A=\frac{1}{2}\mu' v^2,$$

где μ'—фиктивная масса снаряда, равная

$$\mu'=\frac{\varphi q}{g}=i\left(1+\lambda_2\frac{\omega}{q}\right)\frac{q}{g},$$

где i—коэфициент, учитывающий действие вредных факторов—откат орудия, действие нарезов, трение и износ,—равный 1,05; λ_2—правильная дробь.

Интересно отметить, что одно и то же выражение фиктивной массы μ' встречается у Шарбонье и в уравнении инерции и в основном уравнении движения снаряда.

Сюго принимает $i=1{,}07$, а $\lambda_2=\frac{1}{4}$.

Бианки, а также проф. Н. Ф. Дроздов дают для фиктивной массы выражение

$$\frac{\varphi q}{g}=i\frac{q}{g}.$$

При этом проф. Н. Ф. Дроздов, оставляя это выражение в уравнении инерции, для основного уравнения движения снаряда в величину i вводит множитель $\left(1+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\psi\right)$, где ψ—относительный вес сгоревшей части заряда.

Из приближенных формул для вычисления коэфициента фиктивности следует отметить формулу инж. В. Е. Слухоцкого:

$$\varphi=K+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q},$$

где для K в среднем принимается:

для гаубиц . . . $K=1{,}06$,
„ пушек . . . . $K=1{,}05$,
„ длинных пушек . . . . $K=1{,}03$.

Проф. Б. Н. Окунев рекомендует упрощенную формулу, которая дает хорошие результаты для пушек:

$$\varphi = 1{,}03\left(1+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\right).$$

Величина коэфициента фиктивности φ для существующих артиллерийских систем изменяется в пределах от 1,05 до 1,20. При этом для пушек $\varphi=1{,}07—1{,}08$, для винтовок и длинных пушек $\varphi=1{,}10—1{,}20$. Что касается сверхдальнобойных пушек, то для них φ будет более 2,0.

В некоторых случаях, когда не требуется точного вычисления величины φ, можно пользоваться значением $\varphi=1{,}07$. Это значение принимает Сюго. Проф. Н. Ф. Дроздов в своих таблицах принимает $\varphi=1{,}05$.

Из приведенных формул, выражающих коэфициент фиктивности, как подробных, так и упрощенных видно, что все они содержат некоторые коэфициенты, точное значение которых неизвестно. Последнее обстоятельство сравнительно мало влияет на величину φ при обычных условиях, но в случаях больших значений относительного веса заряда $\frac{\omega}{q}$ имеет существенное значение.

Необходимо помнить, что при определении коэфициента φ не учитывается целый ряд второстепенных работ. Часть из них не принимается во внимание по малости, часть работ не учитывается вследствие недостаточности опытного материала. Некоторые из этих работ, связанные с потерей тепловой энергии пороховых газов, можно до некоторой степени учесть соответствующими изменениями величины силы пороха f и коэфициента адиабаты k.

В формулу для коэфициента фиктивности φ не была включена работа форсирования, имеющая достаточно большое значение в начале движения. Если учитывать эту работу на всем пути снаряда l, то, обозначая ее $\mathbf{A}_6$, будем иметь:

$$\mathbf{A}=\frac{\varphi q v^2}{2g}+\mathbf{A}_6.$$

Тогда для коэфициента фиктивности получим следующую величину:

$$\left(\varphi+\frac{\mathbf{A}_6}{\frac{qv^2}{2g}}\right).$$

Интересно отметить влияние бутылочности зарядной каморы на величину коэфициента фиктивности φ, отмечаемое инж. В. Е. Слухоцким в его работе „Производительность зарядов“.

Как указывалось выше (§ 20), бутылочность каморы, оказывая влияние на закон распределения давления между дном

снаряда $p_{сн}$ и дном каморы $p_{дн}$, будет влиять и на величину работы, затрачиваемой пороховыми газами на поступательное движение продуктов горения и заряда $\mathbf{A}_4$. Изменение величины работы $\mathbf{A}_4$, являющейся основной частью второстепенных работ, производимых пороховыми газами, скажется и на величине коэфициента фиктивности φ.

В формулу для φ вместо коэфициента $\frac{1}{3}$ инж. В. Е. Слухоцкий вводит коэфициент λ_2, меньший $\frac{1}{3}$ и изменяющийся при движении снаряда по каналу орудия:

$$\varphi = K + \lambda_2 \frac{\omega}{q},$$

где

$$\lambda_2 = \frac{1}{3}\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + l}\right)^2 \frac{W}{W + sl} + \frac{1}{3}\frac{s}{W + sl}\frac{1}{(\lambda_0 + l)^2}\left[(\lambda_0 + l)^3 - \lambda_0^3\right].$$

Здесь объем каморы до горловины обозначен через W, l—расстояние от дна снаряда до горловины каморы, а λ_0—длина каморы от горловины до дна каморы (фиг. 45).

Эта формула показывает, что с увеличением бутылочности каморы коэфициент λ_2 уменьшается, вследствие чего будет уменьшаться и коэфициент фиктивности.

32. ФИКТИВНАЯ МАССА СНАРЯДА В УРАВНЕНИЯХ РАБОТЫ И ДВИЖЕНИЯ

Коэфициент фиктивности входит в уравнения, определяющие давление пороховых газов и скорость снаряда.

Выше было показано, что коэфициент фиктивности φ принимает различные значения в случае абсолютного и относительного движений.

Это различие в величине коэфициента фиктивности будет оказывать влияние на вычисляемую с помощью уравнений работы и движения величину давления и скорости.

Выясним, какое выражение фиктивной массы снаряда следует брать в уравнениях работы и движения, для чего используем указания проф. И. П. Граве.

Рассматривая относительное движение снаряда, воспользуемся уравнением 4, определяющим работу $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{A} = \frac{\varphi_*^{\text{п}} q v^2}{2g}.$$

Отсюда, диференцируя, получим:

$$d\mathbf{A} = \frac{\varphi q}{g} v\, dv,$$

Подставляя сюда выражение коэфициента фиктивности по формуле 87

$$\varphi = \frac{q}{q\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)},$$

получим:

$$d\mathbf{A} = \frac{\varphi q}{g} v\,dv = \frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)} v\,dv, \tag{88}$$

т. е. в этом случае в уравнении для работы **A** вместо фиктивной массы $\frac{\varphi q}{g}$ следует брать массу $\frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)}$.

С другой стороны, имеем:

$$\mathbf{A} = \int_0^l ps\,dl,$$

откуда, диференцируя, получим:

$$d\mathbf{A} = ps\,dl. \tag{89}$$

Приравнивая правые части уравнений 88 и 89, найдем:

$$ps\,dl = \frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)} v\,dv,$$

откуда:

$$ps = \frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)} v\frac{dv}{dl}$$

или

$$ps = \frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)} \frac{dv}{dt}.$$

Сравнивая это уравнение с уравнением движения, видим, что в этом случае и в уравнении движения вместо фиктивной массы $\frac{\varphi q}{g}$ следует брать массу $\frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)}$.

Итак, в случае рассмотрения относительного движения снаряда вместо фиктивной массы снаряда $\frac{\varphi q}{g}$ следует брать массу $\frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)}$ как в уравнении работы, так и в уравнении движения.

Это выражение фиктивной массы может быть представлено иначе, если в уравнение

$$\frac{\varphi q}{g} = \frac{q_1}{g\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)}$$

подставить значение $\frac{q_1}{g}$ и $\varphi_н$ из 81 и 80.

После подстановки получим:

$$\frac{\varphi q}{g} = \frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]}{1+\frac{q_1}{Q_0}}\frac{q}{g}.$$

Теперь рассмотрим абсолютное движение снаряда.

Из уравнения, определяющего работу **A**, при скорости в абсолютном движении имеем:

$$\mathbf{A} = \frac{\varphi q}{2g} v_a^2,$$

откуда после диференцирования получаем:

$$d\mathbf{A} = \frac{\varphi q}{g} v_a\, dv_a. \tag{90}$$

С другой стороны, на основании уравнения (84), найдем:

$$d\mathbf{A} = \frac{q_1}{g}\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right) v_a\, dv_a. \tag{91}$$

Приравнивая правые части уравнений 90 и 91, будем иметь:

$$\frac{\varphi q}{g} v_a\, dv_a = \frac{q_1}{g}\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right) v_a\, dv_a.$$

Таким образом, в этом случае в уравнении для работы вместо фиктивной массы $\frac{\varphi q}{g}$ следует брать массу $\frac{q_1}{g}\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)$.

С другой стороны, имеем:

$$\mathbf{A} = \int_0^l ps\, dl, \tag{92}$$

где l есть путь снаряда в относительном движении, равный

$$l = l_a + l_{Q_0}.$$

Отсюда, диференцируя и вынося за скобки dl_a, получим:

$$dl = dl_a + dl_{Q_0} = \left(1+\frac{dl_{Q_0}}{dl_a}\right) dl_a.$$

Имея в виду зависимость между путями, пройденными снарядом, имеющим массу $\frac{q_1}{g}$, и орудием, по предыдущему (§ 22) найдем

$$l_a = \frac{Q_0}{q_1} l_{Q_0},$$

откуда после диференцирования имеем:

$$dl_a = \frac{Q_0}{q_1} dl_{Q_0}$$

или

$$\frac{dl_{Q_0}}{dl_a} = \frac{q_1}{Q_0}.$$

Используя это равенство, найдем:

$$dl = \left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right) dl_a.$$

Если продиференцировать уравнение 92 и подставить полученное выражение для dl, будем иметь:

$$d\mathbf{A} = ps\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right) dl_a.$$

Подставляя сюда значение $d\mathbf{A}$ из уравнения 91, найдем

$$ps\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right) dl_a = \frac{q_1}{g}\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right) v_a dv_a$$

или

$$ps = \frac{q_1}{g} v_a \frac{dv_a}{dl_a}.$$

Имея в виду ранее полученную зависимость 63, можем написать:

$$ps = \frac{q_1}{g} \frac{dv_a}{dl_a}.$$

Сравнивая полученное уравнение с уравнением движения

$$ps = \frac{\varphi q}{g} \frac{dv}{dt}$$

заключаем, что в случае рассмотрения абсолютной скорости в уравнении движения следует брать вместо фиктивной массы $\frac{\varphi q}{g}$ массу $\frac{q_1}{g}$.

Итак, в случае рассмотрения абсолютного движения снаряда фиктивную массу снаряда $\frac{\varphi q}{g}$ следует брать различной.

В уравнении работы следует брать массу снаряда $\frac{q_1}{g}\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)$:

$$\frac{\varphi q}{g} = \frac{q_1}{g}\left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right) = \left(1 + \frac{q_1}{Q_0}\right)\left(1 + \eta\frac{\omega}{q}\right)[1 + \mu \operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu)]\frac{q}{g},$$

а в уравнении движения следует брать массу $\frac{q_1}{g}$:

$$\frac{\varphi q}{g} = \frac{q_1}{g}$$

или

$$\frac{\varphi q}{g} = \left(1 + \eta\frac{\omega}{q}\right)[1 + \mu \operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta + \nu)]\frac{q}{g}.$$

Следует заметить, что на практике и в случае абсолютного движения снаряда возможно пользоваться одинаковой фиктивной массой $\frac{\varphi q}{g} = \frac{q_1}{g}$ и в уравнении работы, для чего необходимо в основном уравнении пиродинамики умножить $(k-1)$ на $\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)$.

Если же пользоваться одинаковой фиктивной массой $\frac{\varphi q}{g} = \frac{q_1}{g}\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)$, что является более удобным, то следует умножать величину конечного импульса давления I_k на $\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)$ в выражении скорости

$$v_a = \frac{sg\,I_k}{q_1}(z - z_0),$$

где I_k — конечный импульс давления; $z = \frac{I}{I_k}$ — относительный импульс давления, равный в случае геометрического закона горения относительной толщине сгоревшего слоя $\frac{e}{e_1}$ (e_1 — половина наименьшего размера); z_0 — значение относительного импульса, отвечающее началу первого пиродинамического периода.

Или, в случае необходимости получения абсолютной скорости, можно вычисленную относительную скорость разделить на $\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)$, что избавит от усложнения полученных ранее формул и явится весьма простым методом вычисления.

Что касается пути снаряда, то также, в случае надобности, при рассмотрении абсолютного движения снаряда следует учитывать коэфициент i (§ 22), вносящий соответствующую поправку в величину пути снаряда. Но обычно этой поправкой пренебрегают.

Задачи 57—64. **Вычисление коэфициента φ.**

57) 7,62-*мм* винтовка.

Исходные данные

Вес заряда	$\omega = 0{,}00325$ *кг*.
Вес пули	$q = 0{,}0096$ *кг*.
Вес откатных частей	$Q_0 = 4{,}00$ *кг*.
Угол наклона нарезов	$\operatorname{tg}\beta = 0{,}0997$
Коэфициент инерции снаряда	$\mu = 0{,}450$.
Коэфициент трения	$\nu = 0{,}176$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения	$\theta = \frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении для живой силы	$\eta = \frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)=1{,}128.$$

	$\lg q$	$\overline{3}{,}9823$			
(+)	$\mathrm{colg}\,Q_0$	$\overline{1}{,}3979$		$\mathrm{tg}\,\beta$	0,100
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{3}{,}3802$		$(\mathrm{tg}\,\beta+0\,176)$	0,276
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0024		$\lg(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{1}{,}4409$
			(+)	$\lg\mathrm{tg}\,\beta$	$\overline{2}{,}9986$
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0024		$\lg\mu$	$\overline{1}{,}6532$
	$\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0072		$\lg\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{2}{,}0927$
	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}{,}5229$		$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0024
(+)	$\lg\omega$	$\overline{3}{,}5119$	(+)	$\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,1136
	$\lg\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0030		$\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,0124
	$\mathrm{colg}\,q$	2,0177		φ	1,1284
$\lg\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$		$\overline{1}{,}0555$			

58) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}879$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q = 6{,}550$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 470{,}0$ *кг*.
Угол наклона нарезов . . . . . $\mathrm{tg}\,\beta = 0{,}1047$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}560$.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\Theta = \frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)=1{,}077.$$

(+)	$\lg q$	0,8162		$\operatorname{tg}\beta$	0,105
	$\operatorname{colg} Q_0$	$\overline{3}$,3279			
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,1341		$(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	0,281
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0139		$\lg(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	$\overline{1}$,4487
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0139	(+)	$\lg\operatorname{tg}\beta$	$\overline{1}$,0199
				$\lg\mu$	$\overline{1}$,7482
	$\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0417		$\lg\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	$\overline{2}$,2168
	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}$,5229		$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0139
	$\lg\omega$	$\overline{1}$,9440	(+)		
(+)				$\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,0466
	$\lg\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0179		$\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	0,0165
	$\operatorname{colg} q$	$\overline{1}$,1838			
				φ	1,0770
$\lg\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$		$\overline{2}$,6686			

59) 76,2-*мм* пушка образца 1902 г.
По данным задачи 56.
Определяем φ_a по формуле:

$$\varphi_a=\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]=$$

$$=\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]q}{Q_0}\right\}[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]=$$

$$=1{,}077.$$

$\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	1,0458
$[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	1,0165
$\frac{q}{Q_0}$	0,0139
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0196
(+) $\lg[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	0,0069
$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,1341
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,1606
$\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\,q}{Q_0}\right\}$	1,0145
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0196
(+) $\lg\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\,q}{Q_0}\right\}$	0,0060
$\lg[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	0,0069
$\lg\varphi_a$	0,0325
φ_a	1,077

60) 76,2-*мм* горная пушка образца 1909 г. системы Шнейдера Данглиса.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 0{,}370$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q = 6{,}550$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 275{,}0$ *кг*.
Угол наклона нарезов . . . . . $\mathrm{tg}\,\beta = 0{,}1051$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}560$.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)=1{,}065.$$

(+)	$\lg q$	0,8162
	$\mathrm{colg}\,Q_0$	$\overline{3}$,5607
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,3769
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0238
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	$\overline{1}$,0238
	$\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	$\overline{1}$,0714
	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}$,5229
(+)	$\lg\omega$	$\overline{1}$,5682
	$\lg\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0298
	$\mathrm{colg}\,q$	$\overline{1}$,1838
$\lg\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$		$\overline{2}$,3047

	$\mathrm{tg}\,\beta$	0,126
	$(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,302
	$\lg(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{1}$,4800
(+)	$\lg\mathrm{tg}\,\beta$	$\overline{1}$,0989
	$\lg\mu$	$\overline{1}$,7482
	$\lg\mu\,\mathrm{tg}\,\beta(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{2}$,3271
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0238
(+)	$\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,0202
	$\mu\,\mathrm{tg}\,\beta(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,0212
	φ	1,0652

61) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . ω = 0,863 *кг*.
Вес снаряда . . . . . q = 22,93 *кг*.
Вес откатных частей . . . . . Q_0 = 550,0 *кг*.
Угол наклона нарезов . . . . . $\mathrm{tg}\,\beta_д$ = 0,1572.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . μ = 0,580.
Коэфициент трения . . . . . ν = 0,176.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . $\Theta=\frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta=\frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)=1{,}086.$$

(+)	$\lg q$	1,3604		$\operatorname{tg}\beta$	0,157
	$\operatorname{colg} Q_0$	$\overline{3}$,2596			
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,6199		$(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	0,333
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0417		$\lg(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	$\overline{1}$,5224
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0417	(+)	$\lg\operatorname{tg}\beta$	$\overline{1}$,1965
				$\lg\mu$	$\overline{1}$,7634
	$\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	1,1251		$\lg\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	$\overline{2}$,4823
	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}$,5229		$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0417
	$\lg\omega$	$\overline{1}$,9360	(+)	$\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,0141
(+)	$\lg\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0511		$\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+0{,}176)$	0,0304
	$\operatorname{colg} q$	$\overline{2}$,6396		φ	1,0862
	$\lg\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	$\overline{2}$,1496			

62) 122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа.
По данным задачи 59.
Определяем φ_a по формуле:

$$\varphi_a=\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)\left(1+\frac{q_1}{Q_0}\right)[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]=$$

$$=\left(1+\eta_1\frac{\omega}{q}\right)\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]\,q}{Q_0}\right\}[1+\mu\operatorname{tg}\beta(\operatorname{tg}\beta+\nu)]=$$

$$=1{,}087.$$

$\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	1,0125
$[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	1,0304
$\frac{q}{Q_0}$	0,0417
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0052
(+) $\lg[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	0,0128
$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,6199
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\,\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,6379
$\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\,q}{Q_0}\right\}$	1,0434
$\lg\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)$	0,0052
(+) $\lg\left\{1+\frac{\left(1+\eta\frac{\omega}{q}\right)[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]\,q}{Q_0}\right\}$	0,0183
$\lg[1+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)]$	0,0128
$\lg\varphi_\alpha$	0,0363
φ_α	1,087

63) 152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. системы Шнейдера.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega = 2{,}15$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q = 41{,}0$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0 = 1435$ *кг*.
Угол наклона нарезов . . . . . $\mathrm{tg}\,\beta = 0{,}1572$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu = 0{,}560$.
Коэфициент трения . . . . . $\nu = 0{,}176$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . . $\theta = \frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta = \frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\,\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\,\frac{\omega}{q}\left(1+3\,\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)=1{,}077.$$

	$\lg q$	1,6128
(+)	$\mathrm{colg}\,Q_0$	4.8432
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{2}$,4560
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0286
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0286
	$\left(1+3\,\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0858
	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}$,5229
	$\lg\omega$	0,3324
(+)	$\lg\left(1+3\,\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0358
	$\mathrm{colg}\,q$	$\overline{2}$,3872
	$\lg\left[\frac{1}{3}\,\frac{\omega}{q}\left(1+3\,\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	$\overline{2}$,2783

	$\mathrm{tg}\,\beta$	0,157
	$(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,333
	$\lg(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{1}$,5224
(+)	$\lg\mathrm{tg}\,\beta$	$\overline{1}$,1965
	$\lg\mu$	$\overline{1}$,7482
	$\lg\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{2}$,4671
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0286
(+)	$\left[\frac{1}{3}\,\frac{\omega}{q}\left(1+3\,\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,0190
	$\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,0293
	φ	1,0769

64) 305-*мм* морская пушка системы Виккерса.

Исходные данные

Вес заряда . . . . . $\omega=127{,}9$ *кг*.
Вес снаряда . . . . . $q=385{,}9$ *кг*.
Вес откатных частей . . . . . $Q_0=53{,}000$ *кг*.
Угол наклона нарезов . . . . . $\mathrm{tg}\,\beta=0{,}1048$.
Коэфициент инерции снаряда . . . . . $\mu=0{,}530$.
Коэфициент трения . . . . . $\nu=0{,}176$.
Коэфициент распределения заряда в выражении количеств движения . . . . $\Theta=\frac{1}{2}$.
Коэфициент распределения заряда в выражении живой силы . . . . . $\eta=\frac{1}{3}$.

$$\varphi=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{\omega}{q}\left(\eta+2\Theta\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+\nu)=$$

$$=\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)+\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)+\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)=1{,}136.$$

(+)	$\lg q$	2,5865
	$\mathrm{colg}\,Q_0$	$\overline{5}$,2757
	$\lg\frac{q}{Q_0}$	$\overline{3}$,8622
	$\frac{q}{Q_0}$	0,0073
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0073
	$\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0219
(+)	$\lg\frac{1}{3}$	$\overline{1}$,5229
	$\lg\omega$	2,1069
	$\lg\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)$	0,0095
	$\mathrm{colg}\,q$	$\overline{3}$,4135
	$\lg\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	$\overline{1}$,0528

	$\mathrm{tg}\,\beta$	0,105
	$(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,281
	$\lg(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{1}$,4487
(+)	$\lg\mathrm{tg}\,\beta$	$\overline{1}$,0209
	$\lg\mu$	$\overline{1}$,7243
	$\lg\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	$\overline{2}$,1939
	$\left(1+\frac{q}{Q_0}\right)$	1,0073
(+)	$\left[\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}\left(1+3\frac{q}{Q_0}\right)\right]$	0,1129
	$\mu\,\mathrm{tg}\,\beta\,(\mathrm{tg}\,\beta+0{,}176)$	0,0156
	φ	1,1358

§ 33. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ПОТЕРЬ И РАБОТ, ПРОИЗВОДИМЫХ ПОРОХОВЫМИ ГАЗАМИ, И КОЭФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДА

Из изложенного видно, что в данный момент мы не можем точно определить действительную величину работы, производимой пороховыми газами, и вычислить ее для любого момента времени.

Для некоторых работ, как мы видим, балистика располагает более или менее точными зависимостями, тогда как многие работы совсем не могут быть учтены.

То же относится и к потерям энергии пороховых газов, часть которых совершенно не учитывается.

Всю сумму неучитываемых работ и потерь приходится определять как разность между полной энергией газов и суммой учитываемых работ и потерь.

Потенциал пороха П, представляющий собою максимальную возможную работу, производимую порохом, будет содержать в себе, во-первых, учитываемую механическую работу **А**, во-вторых, неучтенную работу и потенциальную энергию вышедших из канала орудия газов U и, в-третьих, то количество теплоты, которое поглощается стенками орудия $Q_т$. Следовательно,

$$П\omega = \mathbf{A} + EU + EQ_т .$$

Так как в этом уравнении более или менее точно известно значение П и **А**, то величины U и $Q_т$, мало известные в отдельности, можно определить как разность ($П\omega$—**А**).

Приближенно величину $Q_т$ можно вычислить, если считать, что U есть только потенциальная энергия выходящих газов, которая определится, если известно давление и температура газов в момент выхода их из канала.

Распределение энергии пороховых газов вычислено у Лонгриджа для 10-дюймовой пушки, а более поздние данные имеются в работах проф. Кранца и Роте, а также у Брунсвига.

Лонгридж получил вычислением следующее распределение энергии в процентах (табл. 10).

Таблица 10

Работы и потери	% от всей работы
Живая сила снаряда	68,14
Живая сила продуктов горения	13,50
Живая сила орудия и лафета	0,69
Живая сила снаряда во вращательном движении	0,37
Работа трения снаряда по нарезам	0,50
Работа трения снаряда	0,01
Работа сопротивления воздуха (статическая)	0,06
Работа сопротивления воздуха (динамическая)	0,06
Работа напряжения стенок орудия	0,16
Энергия, эквивалентная потере при нагревании стенок орудия	4,08
Работа трения газов	12,48
Общее количество произведенной работы	100

Из таблицы видно, что относительная затрата энергии на некоторые работы примерно совпадает с величинами, указанными выше, а именно: работа, связанная с откатом орудия и лафета, равна 1% от $\mathbf{A}_1$, работа, затрачиваемая на вращательное движение снаряда, составляет около 0,8% от $\mathbf{A}_1$, и несколько меньше обычной получается работа, затрачиваемая на трение о нарезы, 0,74% от $\mathbf{A}_1$.

Значительно выше обычных величин получена работа на поступательное движение продуктов горения и заряда, соста-

вляющая 19,8% от A_1, что может быть объяснено большой величиной $\frac{\omega}{q}$ $\left(\text{при } \omega = 120\ кг \text{ и } q = 200\ кг, \frac{\omega}{q} = 0{,}6\right)$.

Также велика работа трения продуктов горения: 18,3% от A_1.

На нагревание стенок орудия затрачено 6,0% от A_1 и на все остальные работы около 0,3%.

Очень велика потеря энергии, эквивалентная теплоте, уносимой пороховыми газами ($П_\omega$—A). Она составляет 85,4% потенциальной энергии заряда.

Получившиеся отклонения от обычных величин связаны также и с неточностью формул, которыми пользовался Лонгридж, но все же этот расчет в основном дает примерное распределение энергии пороховых газов.

Распределение энергии при ружейной стрельбе, полученное проф. Кранц и Роте, показано в табл. 11.

Здесь следует отметить очень высокую тепловую потерю: 68% от A_1.

Таблица 11

Работы и потери	% от A_1
Кинетическая энергия продуктов горения	16,00
Энергия вращательного движения	0,48
Энергия откатных частей .	0,33
Полная тепловая потеря .	68,5

Это указывает на необходимость увеличения при расчетах для винтовок коэфициента фиктивности φ или же следует вводить поправку в величину силы пороха f, соответственно уменьшая ее.

Таким образом как у Лонгриджа, так и по данным профессора Кранца и Роте очень велика потеря энергии, уносимой выходящими пороховыми газами, и необходимы меры к использованию этой энергии для повышения полезного действия порохового заряда.

По данным Брунсвига при выстреле из ружья получается следующее распределение энергии заряда (табл. 12)

Таблица 12

Работы и потери	*кал*	%
Кинетическая энергия снаряда у дула	905	32,8
Энергия вращения снаряда у дула	4	0,1
Отдача тепла стволу, включая сюда сотрясение ствола и другие виды механической энергии, превращающиеся в теплоту	620	22,8
Энергия отдачи	24	0,9
Теплота и энергия пороховых газов у дула, теплота в выброшенных гильзах	1209	43,4
Энергия, находящаяся в пороховом заряде	2762	100

Здесь также очень велика потеря энергии, уносимой пороховыми газами, а также велика и затрата энергии на нагревание ствола.

Использование энергии порохового заряда характеризуется коэфициентом полезного действия заряда в данном орудии.

Коэфициент полезного действия заряда можно представить в виде отношения:

$$\frac{A_1}{\Pi\omega}.$$

Его величина колеблется по данным Гейденрейха (который называет это отношение „использованием пороха“) примерно от 9 до 38%: для ружей от 9 до 33% (у современных), для пушек от 16 до 38%.

Для наших современных систем мы имеем колебания для пушек примерно от 24 до 34,5%, для гаубиц от 22 до 38% и для мортир около 27%.

ГЛАВА V

ПЕРИОД ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

Период последействия пороховых газов[1] в настоящее время сравнительно мало изучен.

Пороховые газы по мере выхода их из канала орудия после вылета снаряда продолжают действовать на орудие и на снаряд.

Вопрос о последействии пороховых газов на орудие имеет значение при расчетах компрессоров и накатников, когда требуется знать величину наибольшей скорости отката, а также изменение скорости отката в функции от времени.

Наибольшую скорость свободного отката $V_{0\,max}$ обычно определяют по формуле, указанной в § 23,

$$V_{0\,max}=\frac{q+\beta\omega}{Q_0}v_д.$$

Коэфициент β называется коэфициентом последействия.

Для определения коэфициента β пользуются эмпирическими формулами

$$\beta=\frac{1300}{v_д}$$

или

$$\beta=0{,}67\sqrt{\frac{q}{\omega}}.$$

---

[1] Некоторые авторы относят изучение всех явлений, происходящих около дульного среза после вылета снаряда, к области „промежуточной балистики“.

Так как движение снаряда на небольшом начальном участке траектории происходит под действием сил, рассматриваемых во внутренней балистике, но в несколько иных условиях, то, совершенно естественно, следует относить этот участок к внутренней балистике.

Имеются также более точные формулы, например формула инж. В. Е. Слухоцкого, которую можно представить следующим образом:

$$\beta = a \frac{\Phi(T)}{v_0} \sqrt{\frac{p_д \chi}{\Delta}},$$

где a — коэфициент пропорциональности, Δ — плотность заряжания, $\Phi(T) = 1 - \left(\frac{p_д}{p_a}\right)^{-\frac{k+1}{2k}}$, обычно, для встречающихся дульных давлений функция эта близка к 1, k — показатель адиабаты, $p_a = 1{,}0$ *кг/см²*, χ есть отношение полного объема канала орудия и каморы, $\chi = \frac{W}{W_0}$.

Для удобства вычисления коэфициента β имеются таблицы, составленные для $v_д = 600$ *м/сек* и $p_д = 600$ *кг/см²*. Таблицы имеют два входных числа χ и Δ.

Для наших артиллерийских систем, как указывалось в § 23, β изменяется от 1,8 до 8,7.

Наличие дульного тормоза уменьшает значение коэфициента β и время последействия $t_{посл}$.

Для времени последействия также имеется зависимость:

$$t_{посл} = 2 \frac{\omega}{g} \frac{\left(\beta - \frac{1}{2}\right) v_д}{p_{дн_д}}.$$

Таким образом для последействия пороховых газов на орудие имеются зависимости, по которым можно определить необходимые элементы.

В отношении снаряда вопрос о последействии пороховых газов обстоит значительно сложнее.

Пороховые газы при выходе из канала орудия двигаются со скоростью большей, чем скорость снаряда. Они имеют возможность расширяться в стороны. Под действием сопротивления воздуха скорость движения газов быстро падает.

Изучение движения снаряда на начальном участке траектории необходимо для более точного определения работы, производимой пороховыми газами, и связано с согласованием опытных и расчетных величин начальной скорости, а также имеет значение при проектировании взрывателей и трубок.

Себер и Гюгонью указывают, что пороховые газы после вылета снаряда из канала орудия, двигаясь со скоростью, превышающей скорость снаряда, будут его опережать, и „в течение некоторого промежутка времени снаряд будет двигаться в подвижной среде, вследствие чего его скорость может продолжать возрастать и после выхода из орудия".

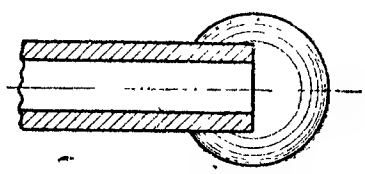
Решение вопроса об изменении скорости снаряда после вылета из орудия связано с опытным исследованием явлений, происходящих около дульного среза в начальные моменты движения снаряда.

В настоящее время с помощью фото- и киносъемок удалось достаточно подробно установить изменения, происходящие в воздухе около дульного среза, картину появления пороховых газов и снаряда, а также последующие явления, связанные с вылетом снаряда из канала орудия.

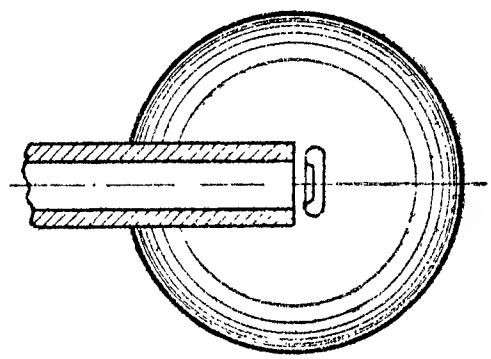
Ход интересующих нас явлений Шарбонье представляет следующим образом.

При смещении снаряда возникает волна, распространяющаяся в канале орудия и в атмосфере в виде сферической волны (фиг. 73). Скорость ее равна скорости звука.

Далее, в связи со сжатием воздуха, находящегося в канале орудия, под действием движущегося снаряда возникает ударная волна. Ударная волна появляется в дульном срезе до снаряда. При этом появляются вихри, принимающие форму кольца (фиг. 74). Поступательная скорость газового вихревого кольца одинакова с дульной скоростью снаряда. С такой же примерно скоростью это кольцо расширяется.

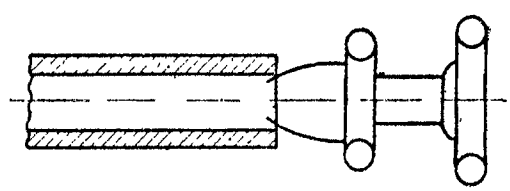


Фиг. 73.



Фиг. 74.

За этим вихревым кольцом появляется струя газа.



Фиг. 75.

Затем появляется снаряд, за которым двигаются газы, дающие свое расширяющееся вихревое кольцо (фиг. 75).

Появившаяся перед дульным срезом масса газа воспламеняется.

При очень малом давлении в конце процесса истечения газы имеют форму чаши.

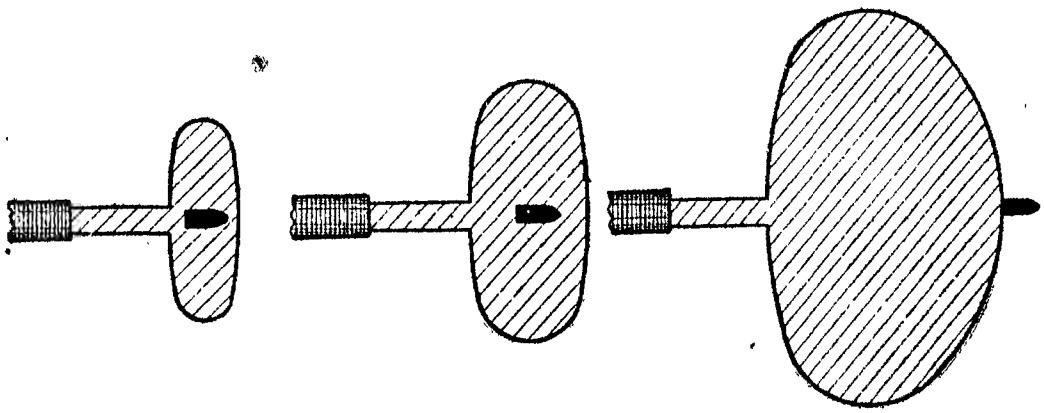
Шарбонье отрицает возможность движения снаряда в облаке газа и считает, что газы по выходе из орудия не могут иметь скорость большую, чем у снаряда.

Это заключение противоречит имеющемуся опытному материалу и выводам целого ряда исследователей (Кранц, Куейль, Кампе-де-Ферье и др.).

По опытам Кампе-де-Ферье, для 30-*см* пушки ($v_д = 720$ *м/сек*) перед появлением снаряда показывается светящееся облако, движущееся со скоростью около 300 *м/сек*.

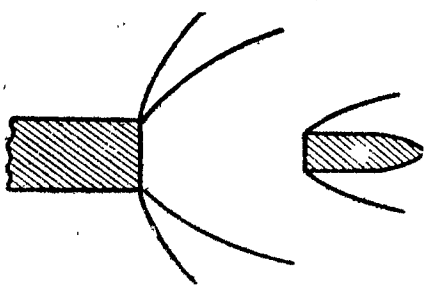
При появлении снаряда газы устремляются в стороны со скоростью около 2000 *м/сек*. После выхода снаряда пороховые

газы двигаются вперед со скоростью около 1400 *м/сек*, обгоняют снаряд, и некоторое время снаряд двигается в массе газа. Скорость газов быстро убывает, тогда как скорость снаряда остается близкой к 720 *м/сек*.



Фиг. 76.

Снаряд покидает газовое облако примерно на расстоянии около 5 *м* от дульного среза.

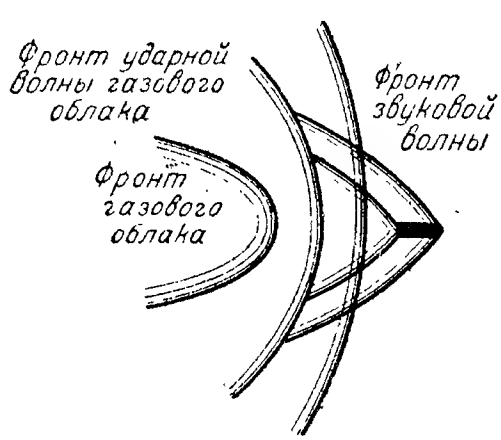


Фиг. 77.

Форма, которую принимают газы, представлена схематично на фиг. 76.

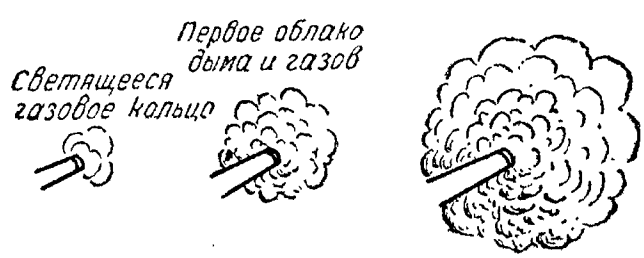
По некоторым данным в первые моменты движения дно пули отклоняет газовые струи, выходящие из канала (фиг. 77), что также свидетельствует о том, что газы обгоняют пулю, и увеличение скорости пули возможно.

Схема расположения звуковой волны, ударной волны газового облака и газового облака при движении пули (при $v_д = 600$ *м/сек*) по материалам баллистической лаборатории ордена Ленина Артиллерийской академии РККА им. Ф. Э. Дзержинского, представлена на фиг. 78.



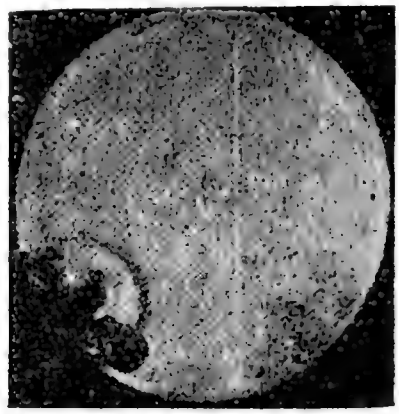
Фиг. 78.

Оттенхеймер также отмечает на основании опытов Эсклангона,



Фиг. 79.

применявшего киноаппарат, появление светлого газового кольца у дульного среза до появления снаряда (фиг. 79).



Фиг. 80.

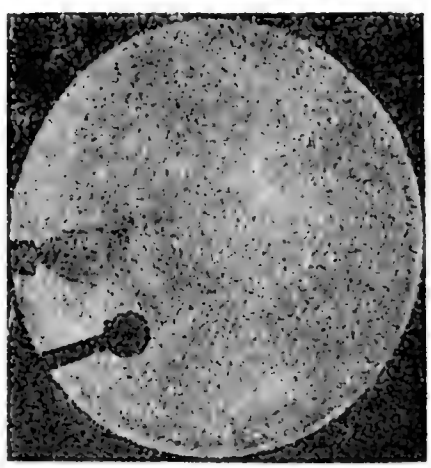
Фиг. 81.

Фиг. 80 и 81. Явления, происходящие около дульного среза до вылета пули в первые моменты после выстрела. Видна сферическая воздушная волна.

Фиг. 82.

Фиг. 83.

Фиг. 82 и 83. Прорвавшиеся вперед пороховые газы. Их передний фронт не догнал еще воздушной волны.



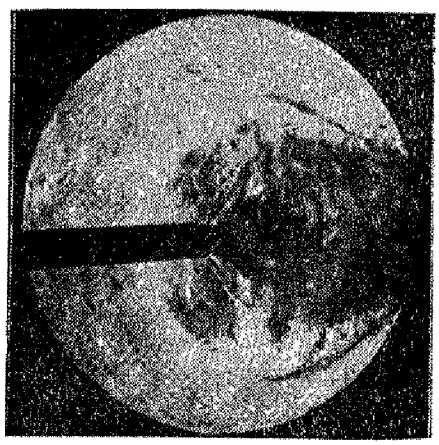
Фиг. 84. Фигура истечения газов в виде рюмки до вылета пули. Заметно присутствие пороховых газов.

Фиг. 85. Момент, когда находящаяся еще в канале пуля близка к дульному срезу.

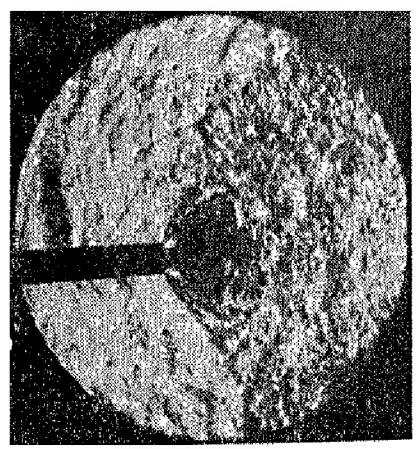
Фиг. 86.

Фиг. 87.

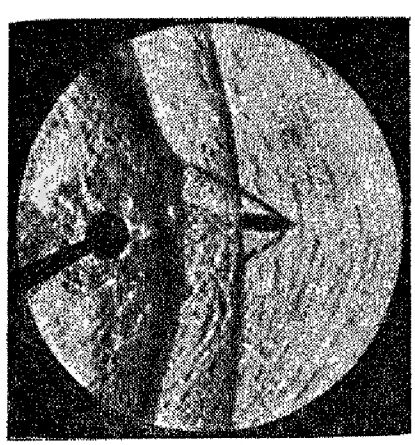
Фиг. 86 и 87. Передний фронт газового облака до вылета пули. Воздушная волна находится вне снимка.



Фиг. 88. Пуля вылетела и находится в газовом облаке примерно в 8 *см* от дульного среза. Виден задний фронт воздушной волны.



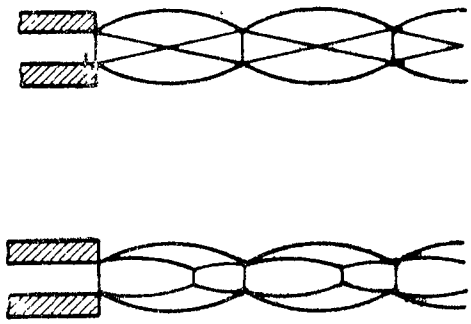
Фиг. 89. Пуля уже вне снимка. Характерное истечение газов и интенсивное возмущение среды.



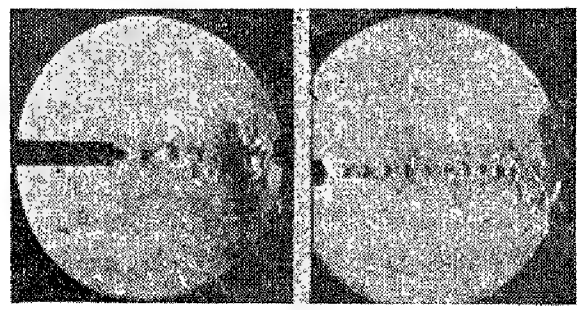
Фиг. 90. Положение пули и волн непосредственно после вылета.

Появление этого кольца он объясняет прорывом газов от воспламенителя из быстрогорящего черного пороха до смещения снаряда по каналу. У Шарбонье также встречается указание, что после форсирования нет прорыва газов вокруг снаряда.

Вслед за газовым кольцом появляются у дула волны газа и дыма, а затем уже „снаряд отделяется из дыма и движется как бы обернутый в светящуюся газовую оболочку".

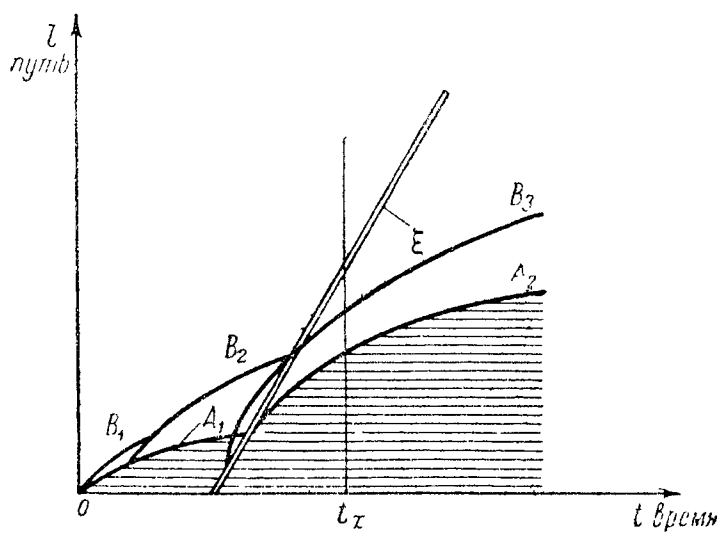


Фиг. 91.



Фиг. 92.

Дальнейшее движение снаряда на начальном участке траектории подвергнуто действию „нерегулярно и несимметрично действующих толчков" пороховых газов, воспламеняющихся от наружного воздуха.



Фиг. 93.

Прилагаемые фотографические снимки (фиг. 80—90), сделанные в указанной балистической лаборатории, дают представление о явлениях, наблюдаемых удульного среза винтовки при выстреле.

Проф. Кранц отмечает появление в некоторых условиях при истечении пороховых газов стоячих волн, которые также обнаружены и другими исследователями (фиг. 91, 92).

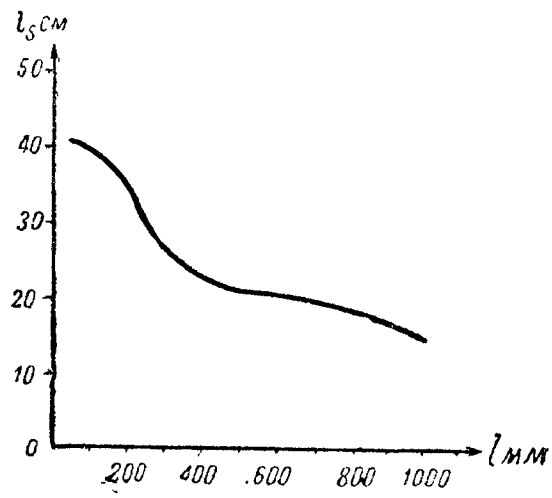
Пеймен и Уудхед получили непрерывную запись явлений на вращающемся барабане специального шлирприбора.

На фиг. 93 изображены линии, определяющие в любой момент положение пули (толстая линия ξ), положение газов (линия A_1 и A_2), положение воздушной и газовой ударных волн (линии B_1, B_2 и B_3).

Особый интерес представляют данные этих опытов, относящиеся к явлениям до вылета пули.

Длина участка последействия l_s у винтовки на основании данных той же балистической лаборатории, зависит от длины ствола (фиг. 94).

Для обычной длины винтовки длина участка будет около 20 *см*. Длина участка последействия увеличивается для изношенных стволов, а также при уменьшении заряда.

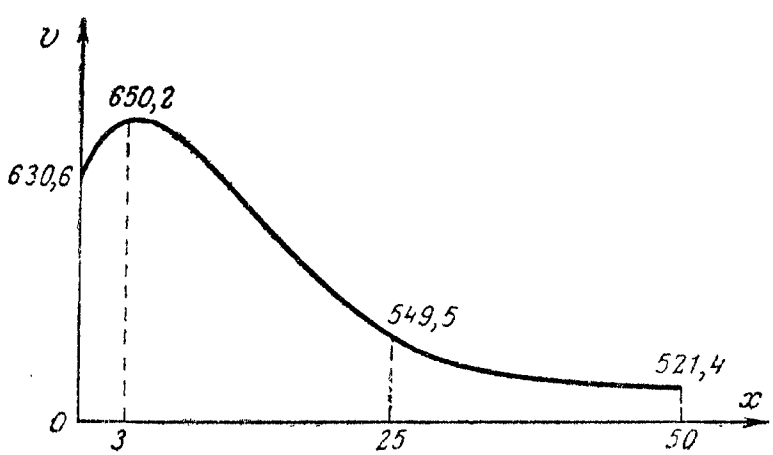


Фиг. 94.

Детальное изучение всех явлений, происходящих при вылете снаряда, было произведено и в более поздних японских опытах Аоки, Хаживата, а также Теразава, Тамапо и Хаттори.

Остается коснуться вопроса об увеличении скорости снаряда или пули на участке последействия газов.

По американским опытам Крехора и Сквайра для полевой пушки (3,2 *дюйм*) скорость снаряда увеличивалась после вылета на 2,5%, причем точка с наибольшей скоростью находится на расстоянии около 25 калибров (около 2 *м*).



Фиг. 95.

Незначительное увеличение скорости получилось и по опытам Индра в Германской ружейной испытательной комиссии (фиг. 95), а также и у Окоци. Последний получил увеличение скорости для японской винтовки на 0,8%, причем место наибольшей скорости находилось на расстоянии 1,5 *м*.

Некоторые опыты не обнаружили максимума скорости, другие же показали наличие относительного максимума меньшего, чем дульная скорость (Вольф, Радакович).

Позднейшие английские опыты с пулей и французские опыты со снарядом (Кампе-де-Ферье) не обнаружили заметного изменения в скорости снаряда после вылета.

На основании имеющегося материала можно заключить, что изменение в скорости снаряда после вылета незначительно и при существующих способах измерения начальной скорости

для вопросов, рассматриваемых внешней балистикой, не имеет большого значения.

Знание действительной дульной скорости, а не фиктивной, каковой является так называемая начальная скорость, гораздо нужнее для внутренней балистики. Зависимости, даваемые внутренней балистикой для вычисления дульной скорости, можно точно проверить только на основании действительных значений скоростей.

Отсюда понятно значение дальнейших опытов для различных орудий, которые должны установить величину приращения скорости и объяснить характер последействия пороховых газов на снаряд.

Большое значение имеют также и теоретические зависимости для определения наибольшего значения скорости снаряда после вылета из канала орудия.

Среди целого ряда таких зависимостей следует отметить формулы инж. В. Е. Слухоцкого, давшего наиболее полное решение вопроса.

Исходным уравнением является выражение для силы реакции струи $P_{сн}$

$$P_{сн} = K \frac{s}{s_п} \frac{G}{g} (V_п - v),$$

где K — опытный коэфициент, $s_п$ и $V_п$ — площадь взятого поперечного сечения струй и скорости в этом сечении, G — секундный расход газов через отверстие.

Числовые данные некоторых артиллерийских систем

(для решения задач)

Наименование артсистемы	$v_д$ *дм/сек*	q *кг*	ω *кг*	p_m *кг/см²*	$l_д$ *дм*	s *дм²*	W_0 *дм³*	$\Delta=\frac{\omega}{W_0}$ *кг/дм³*	$\frac{\omega}{q}$ %	Q_0 *кг*	Полная длина в клб.	$\beta_н$	$\beta_д$	n	$\eta=\frac{p_{ср}}{p_m}$
7,62-*мм* винтовка	8600	0,0096	0,00325	2813	6,83	0,00480	0,0040	0,812	33,9	4,00	—	5°41,6′	5°41,6′	4	—
Испанская винтовка системы Аметральядора	6850	0,011	0,00245	2810	5,27	0,00384	0,0035	0,700	22,3	—	—	—	—	4	—
Винтовка системы Маузера	8610	0,010	0,00325	2809	6,94	0,00384	0,0035	0,930	32,5	—	—	5°48′34″	5°48′34″	4	—
45-*мм* стрелковая пушка	6000	1,15	0,162	2170	11,22	0,1638	0,323	0,502	14,1	100	30,5	7°09′45″	7°09′45″	16	0,543
76-*мм* противоштурм. пушка образца 1910 г. (Путиловского завода)	2743	6,55	0,179	1137	10,14	0,4686	0,684	0,262	2,73	245	16,5	3°00′00″	7°09′45″	24	0,491
76-*мм* горная пушка образца 1909 г. (Шнейдер-Данглис)	3810	6,55	0,371	1850	10,13	0,4686	0,684	0,542	5,66	275	16,5	3°00′00″	7°09′45″	24	0,588
76-*мм* конная пушка образца 1913 г. (Шнейдер)	5720	6,55	0,879	2325	16,14	0,4693	1,699	0,517	13,4	451	27,0	5°58′42″	5°58′42″	24	0,672
76-*мм* пушка образца 1902 г. (Путиловского завода)	5882	6,55	0,879	2325	18,44	0,4693	1,699	0,517	13,4	470	30,0	5°58′42″	5°58′42″	24	0,625
107-*мм* скорострельная пушка образца 1910 г. (Шнейдер)	5800	16,38	1,900	2400	24,55	0,9165	3,399	0,559	11,6	1 119	28,0	7°09′45″	7°09′45″	32	0,561
152-*мм* осадная пушка (Шнейдер)	6400	40,95	6,348	2170	35,26	1,8692	10,327	0,615	15,5	3 304	28,0	7°09′45″	7°09′45″	48	0,650
122-*мм* гаубица образца 1909 г. (Крупп)	3353	22,93	0,863	1757	12,65	1,1945	1,945	0,444	3,76	550	14,0	3°42′00″	8°56′00″	36	0,551
122-*мм* гаубица образца 1910 г. (Шнейдер)	3300	22,80	0,910	1800	12,39	1,1945	2,258	0,403	3,98	565	12,9	12°00′00″	12°00′00″	36	0,512
152-*мм* гаубица образца 1910 г. (Шнейдер)	3353	40,95	2,023	1757	14,58	1,8659	4,040	0,501	4,95	480	12,0	3°42′00″	8°56′00″	36	0,527
152-*мм* крепостная гаубица образца 1910 г. (Шнейдер)	3810	40,95	2,146	1757	17,60	1,8659	4,459	0,482	5,25	1 435	14,0	3°42′00″	8°56′00″	36	0,560
305-*мм* морская пушка системы Виккерса	8940	385,9	127,9	2618	131,50	7,456	196,64	0,650	33,1	53 000	54,0	5°59′00″	5°59′00″	72	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Сравнительная таблица вычисленных работ, производимых пороховыми газами, а также длин и скоростей свободного отката

Работа / Название системы	A *кгдм*	A_1 *кгдм*	A_2 *кгдм*	$\frac{A_2}{A_1}$ %	A_3 *кгдм*	$\frac{A_3}{A_1}$ %	A_4 *кгдм*	$\frac{A_4}{A_1}$ %	A_5 *кгдм*	$\frac{A_5}{A_1}$ %	φ	$V_{0_д}$ *дм/сек*	l_{Q_0} *дм*
7,62-*мм* винтовка	408·10	362·10	16,2	0,45	28,6	0,79	408	11,3	12,8	0,35	1,128	24,0	0,02
76,2-*мм* пушка образца 1902 г.	$1243 \cdot 10^3$	$1154 \cdot 10^3$	709·10	0,62	$119 \cdot 10^2$	1,03	$517 \cdot 10^2$	4,48	1825 10	1,58	1,077	86,3	0,25
122-*мм* гаубица образца 1909 г. системы Круппа	$1427 \cdot 10^3$	$1314 \cdot 10^3$	$183 \cdot 10^2$	1,43	$211 \cdot 10^2$	1,60	$165 \cdot 10^2$	1,26	5680·10	4,32	1,086	137	0,51
305-*мм* морская пушка системы Виккерса	$1785 \cdot 10^5$	$1571 \cdot 10^5$	$917 \cdot 10^3$	0,58	$154 \cdot 10^4$	0,98	$176 \cdot 10^5$	11,2	$1524 \cdot 10^3$	0,97	1,136	75,3	0,95

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Е. В. Агокас — Взрывчатые вещества. Внутренняя и внешняя баллистика, Объед. научн. тех. издательств, 1935 г.

2. Е. В. Агокас — К вопросу об износе и выгорании орудия, «Техника и снабжение Кр. Армии», 1923 г., № 6.

3. Е. Л. Бравин — Колебания пружины с грузом на конце. Изд. ВВА, (лит.), 1936 г.

4. Инж. Браун — Синусоидальная нарезка. «Русский перевод Н. Ульянова, изд. Г. А. У. РККА (Heerestechnik, 1920).

5. Бриджмен — Физика высоких давлений. Перевод пр. Волоровича, ОНТИ, 1938 г.

6. А. Ф. Бринк — Внутренняя балистика, 1901 г.

7. А. Ф. Бринк — Проектирование орудий, ч. 1, 1901 г.

8. Г. Бруневич — Бездымный порох. ОНТИ, Госхимиздат, 1933 г.

9. Н. К. Бухгольц — Истечение газов под большим напором. 1919 г.

10. В. Вахорловский — О режиме стрельбы. «Техника и снабжение Кр. Армии», 1925 г., № 173.

11. В. Вахорловский — Рецензия на книгу Campana «Les progres de l'artillerie». «Техника и Снабжение Красн. Арм.», 1924 г., № 24.

12. Проф. Д. А. Вентцель — Курс Внутренней балистики 1937 г. и 1939 г.

13. Л. Габо — О некоторых причинах неправильности полета снаряда (перев. А. Ф. Головина). Бюллетень Н. Т. С. Военпрома, 1926 г., № 8.

14. Гермониус — К вопросу о разгорании пороховыми газами орудийных стволов. Артил. Журн., 1913 г., № 2.

15. А. Ф. Головин — Исследование износа стволов артиллерийских орудий, 1930 г.

16. А. Ф. Головин — Метод термического травления для определения местных внутренних напряжений в железе и стали. «Журн. и Рус. металл. общ» 1928 г. № 3.

17. А. Ф. Головин — Программа испытаний различных сортов стали на сопротивление износу стрельбой из пулеметных стволов. «Доклады в Междувед. Комиссии при Арт. Ком.», 1928 г., ч. II.

18. Проф. И. П. Граве — Внутренняя балистика. Пиродинамика, вып. I, 1933 г., Изд. Арт. Акад. РККА.

19. Проф. И. П. Граве — Внутренняя балистика. Пиродинамика, вып. II, 1934 г., «Изд. Арт. Акад. РККА».

20. Проф. И. П. Граве — Внутренняя баллитика. Пиродинамика, вып. III, 1936 г., «Изд. Арт. Акад. РККА».

21. Проф. И. П. Граве — Внутренняя балистика. Пиродинамика, вып. IV, 1937 г., «Изд. Арт. Акад. РККА».

22. Проф. Г. Д. Гродский — О распределении давлений газов в канале орудий в любой данный момент. «Война и Техника», 1927 г., № 5.

23. Дагори — Омеднение орудий (пер. Н. Д.). «Война и Техника», 1927 г. № 11—12.

24. Н. И. Довгелевич — О способе изучения разгара металла от действия пороховых газов. «Бюллетень НТС Военпрома», 1926 г., № 8.

25. Проф. Н. Ф. Дроздов—О выгорании артил. орудий. «Доклад Междув. Комис. при Арт. Ком.», 1926 г., ч. I.

26. Проф. Н. Ф. Дроздов— Сопротивление артиллерийских орудий, ч. I, 1926 г.
27. Проф. Н. Ф. Дроздов — Сопротивление артиллерийских орудий и их устройство, ч. II, 1933 г.
28. Жуковский и Рожанский — О выгорании стволов огнестрельного оружия. «Артил. Журн.», 1908 г., №№ 1 и 2.
29. Н. Забудский — О давлении газов бездымного пороха в канале пушек, 1894.
30. Н. Забудский — Внешняя балистика.
31. И. И. Иванов — Основы расчета и проектирования лафетов, 1933.
32. Калакуцкий — Работа по определению давлений пороховых газов в стальных малокалиберных стволах при различных условиях стрельбы. «Оружейный сборник», 1879 г., № 1.
33. И. Р. Карачан — Новейшие исследования и опыты по разгоранию стволов огнестрельного оружия и рекомендуемые сорта специальной стали. «Доклады Междув. Комис. при Арт. Ком.», 1926 г., ч. I.
34. Д. Е. Козловский — Материальная часть артиллерии, 1930 г.
35. А. Л. Корольков — Новые идеи в конструировании орудий. «Техника и Снабжение Кр. Арм.», 1926 г., № 62 (93).
36. В. П. Кравз - Тарновский — Специфическая полоска в стали «Журн. Рус. Метал. Общ.», 1928 г., № 3.
37. Крехор и Сквайер — «Артиллерийский Журнал», 1896 г., № 4.
38. Акад. А. Н. Крылов — О расчете прогрессивной крутизны нарезов. «Изд. Косартопа» 1921 г.
39. И. А. Крылов — Изучение разгорания каналов огнестрельного оружия. 1922 г.
40. И. А. Крылов — Методы исследования разгорания металла в каналах огнестрельного оружия. «Доклады Междув. Ком. при Арт. Комит.», 1926 г., ч. I.
41. Ф. Ф. Лендер — Числовые данные артиллерийских систем на колесных лафетах., 1925 г.
42. Ф. Ф. Лендер — К вопросу о распределении давлений газов между дном снаряда и дном канала. «Изд. Косартопа», 1919 г.
43. Ф. Ф. Лендер — Теория лафетов.
44. Лонгридж — Внутренняя балистика. Рус. перев. А. Нилуса, 1891 г.
45. Максим — Выгорание в орудиях большого калибра. «Артиллерийский Журнал», 1893 г., № 4.
46. Л. Мартюшев и М. Костевич — Омеднение каналов орудий. «Артиллерийский Журнал», 1909 г., № 10.
47. А. Г. Матюнин — Изнашивание орудий. «Артиллерийский Журнал», 1910 г., № 1—3.
48. А. Г. Матюнин — О врезании медных поясков снарядов, 1899 г.
49. А. Г. Матюнин — Заметка о ковке орудийных труб. «Техника и Снабжение Кр. Арм.», 1924 г., № 23 (147).
50. А. Г. Матюнин—Изготовление 16-*дюйм.* пушек в арсенале. Уотервлит «Техника и Снабжение Красной Арм.», 1924 г., № 26 (167).
51. П. Н. Мишин — Вибрация стен орудия и утомляемость металла. «Докл. Междув. Комис. при Арт. Ком.», ч. II.
52. Нилус — Выгорание в каналах длинных орудий. «Артиллерийский Журнал», 1891 г., № 8.
53. Нобль и Эйбль — Действие воспламененного пороха (перевод В. А. Пашкевича), изд. 1878 г.
54. Б. Н. Окунев — Внешняя и внутренняя балистика. «В. Г. И. З.», 1930 г.
55. Оттенхеймер — Внутренняя балистика, 1926 г. (перев. 1930 г.), Изд. Арт. Акад.
56. Проф. В. А. Пашкевич — Колебательное движение в орудии продуктов горения заряда при выстреле, 1929 г.
57. М. Ф. Розенберг — Материалы к исследованию реакции ведущего пояска на стенки орудия и на снаряд, «Артиллерийский Журнал», 1898 г., № 7.

58. М. Ф. Розенберг—Об изнашивании каналов 3-*дюйм.* пушек обр. 1900—1902 г. и о мерах к уменьшению этого явления. «Докл. в Комис. Особ. Арт. Опытов» 1924 г.

59. М. Ф. Розенберг — Объяснительная записка по поводу произведен. на Обуховск. заводе опытов протяжки снарядов через 6-*дюйм.* орудия. «Прибав. 1 к отчету Мор. Техн. Ком. по Артиллерии». 1894 г.

60. М. Ф. Розенберг — Опыт протяжки снарядов через 6-*дюйм.* орудие.

61. М. Ф. Розенберг — Материалы для исследования реакции ведущего пояска на стенки орудия и на снаряд. «Бюл. Н. Т. К. А У. У. С.», 1929 г., № 1.

62. М. Ф. Розенберг — О продольных напряжениях, развивающихся в частях орудия при его скреплении, 1899 г.

63. Роне — Работа и продолжительность службы тяжелых пушек (перев.) «Артил. Журн.», 1919 г., № 1—2.

64. Рюденберг — О скорости распространения и силе скачков уплотнения. «Изд. Косартопа», 1921 г.

65. А. В. Сапожников — О сравнительных качествах нитроглицериновых и пироксилиновых порохов, 1913 г.

66. А. В. Сапожников — Теория взрывчатых веществ. Курс В. Т. А., 1926 г.

67. П. В. Сахаров — Аналогия в некоторых явлениях разрушения рабочих поверхностей артиллерийских орудий и стальных рельс. «Докл. Междувед. Ком. при Арт. Ком.», 1928 г., ч. II.

68. В. В. Свешников — Корбюрация как фактор выгорания пулеметных стволов. (Перев. А. Ф. Головина). «Война и Техника», 1926 г., № 39 (256).

69. М. Е. Серебряков — Внутренняя балистика. «Изд. Госхимиздат», 1933 г.

70. М. Е. Серебряков — Физико-Химическое обоснование расчета изменения температуры пороховых газов в орудии и выбора показателя θ. «Изв. Арт. Акад.», т. XVI, 1935 г.

71. М. Е. Серебряков — Влияние теплоотдачи через стенки при горении пороха в замкнутом объеме.

72. М. Е. Серебряков — Учет потери на теплоотдачу стенкам орудия во время выстрела, 1937 г.

73. В. Е. Слухоцкий — Промежуточная балистика.

74. В. Е. Слухоцкий — Теория гидродинамического орудия. 1931 г.

75. В. Е. Слухоцкий — К вопросу о периоде последействия газа на дно снаряда. «Изв. Арт. Акад., т. XI.

76. В. Е. Слухоцкий — Производительность зарядов. «Изв. Арт. Акад.», т. XVIII, 1936 г.

77. В. Е. Слухоцкий — Определение наибольшей скорости отката, 1929 г.

78. Сюго — Теоретическая внутренняя балистика. (Перевод). «Изд. Арт. Акад.», 1929 г.

79. И. В. Стефанович — Окклюзия газов металлами, как одна из причин выгорания каналов огнестрельного оружия. «Война и Техника», 1927 г., № 10.

80. А. А. Таскин — Балистика, изд. Госвоениздат, 1940 г.

81. В. М. Трофимов — Механика порохового газа. Разгар канала орудия. «Изд. Косартоп'а», 1920 г.

82. В. М. Трофимов — Волнообразное горение пороха, Ленинград, 1928 г.

83. В. М. Трофимов — Указания для выбраковки и разделения на категории каналов орудийных стволов по степени их разгара от стрельбы, «ГИЗ», 1921 г.

84. О. Г. Филипов — Краткий курс теории и технологии взрывчатых веществ и порохов, «Изд. ВТА», ч. I., 1927 г.

85. Д. К. Чернов — О выгорании стальных орудий пороховыми газами. «Артиллерийский Журнал», 1912 г., № 7, 1915 г.

86. К. К. Черняевский — Влияние радиальных деформаций на живучесть орудий, «Бюл. В. Тех. Ком. У. В. М. С.», 1928 г., № 2.

87. Шарбонье — Гипотезы об износе каналов орудий (перевод А. Ф. Головина). «Воен. Техн. Зарубежник» вып. I, 1925 г.
88. Юстров — Теоретические соображения о продолжительности службы стволов огнестрельных орудий. «Известия ВТА», 1927 г.
89. И. Яковлев — Лайнер для орудия. «Бюл. НТС Военпром.», 1926 г., № 7.
90. И. Яковлев — Металл иностранных пушек, «Война и Техника», 1927 г., № 5.
91. И. Яковлев — Орудия со свободным лайнером, вставленным с отрицательным натяжением (по данным Дж. Маскаруччи), «Бюл. НТС Военпром.» 1926 г., № 4—5.
92. И. Яковлев — Снаряды с нарезами. «Война и Техника», 1927 г., № 11—12.
93. И. Яковлев — Сталь для орудий. «Война и Техника», 1925 г., № 30 (195).
94. Инж. П. Ф. Юлин — Свободное лайнирование. 1932 г.
95. Инж. П. Ф. Юлин — Значение технологического фактора (различной обработки поверхности канала) в износе каналов орудий. «Изв. Военно-Механич. Институт.», 1936 г.
96. Проф. д-р В. Швиннинг — Конструкция и материал стволов огнестрельного оружия. (Перев. и ред. А. Ф. Головина). «Изд. Арт. Акад.», 1937 г.
97. F. Abel — On the erosion of gun barrels by powder products. «Journ. Ir. a. St. Inst.» 1886, N 11.
98. F. Abel — Action of the projectile and the explosives on the tubes of steel guns. «Journ. Ir. a. St. Inst.» 1898, N 11.
99. P. R. Alger — Erosion and ballistics. «Proc. U. S. Naval Inst.» 1910 dec.
100. P. R. Alger — Gun Erosion. «Journ. U. S. Art», 1909 (v. 31).
101. T. Aoki, M. Hagiwara — A new chronograph andi ts application to the study of the velocity increase of a bullet after leaving the muzzie of a rifle. «The Journal of the Faculty of Engineering» Tokio Imper. Univ, 1928, т. XVII N 14. «Mem. d. l'artill. franc». 1933, N 4.
102. K. Becker — Graphiterung der Seelenwandung von Feuerwaffen. «Artill. Monatsh.», 1910, N 48, S. 437.
103. Bellet — Nos canons et nos fusils s'usent ils vite? «Revue hebdomadaire» Paris 1915, Janv.
104. Bellis — Essais d'érosion des canons de fusil. «Rev. d. metal». (extr.), 1920.
105. Bennington — The death of a big gun. A study in erosion. «Scient. Amer. Monthly», 1920.
106. Bertrand et Laroche — Température, développée dans les armes par le tir. «Mem. des poudres et salpêtres», t. VI, 1893.
107. Billardon — Température, developpée dans les armes par le tir. «Mem. des poudres et salpêtres», T. IX, 1898.
108. Blittersdorff — Der Arbeitsverlust beim Schuss durch Wärmeabgabe an die Waffe. «Kriegs Leits.»
109. Von K. H. Bodlien — Beitrag zur inneren Ballistik gerogener Gewehre unter besonderer Berücksichtigung der Reibungsvorgänge. «Zeitschrift für das gesamte Schiess und Sprengstoffwesen». 1939, N 2 (34). Febr, № 3 März.
110. Bory — Essai sur la ballistique de la fusée. «Mem. de l'art. franc.», 1922, N 3.
111. Bourgoin — Mémoire sur l'usure des bouches a feu. «M. d. l'art. nav.», t. VII, 1913, 2 livr.
112. E. Bravetta — Ausbrennungen in Geschützrohren und Mittel zu ihrer Bekämpfung. «Zeit. f. d. gesam. Schiess u. Spreng.», 1909.
113. E. Bravetta — L'érosion des canons. «Riviste de Artigliera e Genio», 1911.
114. Breger — De la position et de la forme des ceintures des projectiles. «M. d. l'Art. d. la marine» 1880.
115. Bridgman — The physics of high pressure. «London. G. Bell and Sons. Ltd.», 1931.

116. H. Brunswig — Das rauchlose Pulver.
117. Canons de marine de gros calibre. «Engineering», 1913.
118. Campana — Le progrés de l'artillerie, 1923
119. G. H. Carpenter — Le diagramme d'équilibre fer-carbone et son utilité pratique. «Transactions of the Institution of Naval Architects», 1918.
120. P. Charbonnier — Les obus rayés. «Mém. de l'Art. fr»., 1927, 1 fasc.
121. P. Charbonnier — La veine gazeuze. «Mem. de l'Art. fr.», 1922, 4 fasc.
122. P. Charbonnier — Ballistique intérieure. Paris, 1908.
123. P. Charbonnier—Note sur la balistique intermédiaire. «Mem. de l'Art. francaise», 1928, N 3 (27).
124. P. Charbonnier — Les obus rayés. «Mem. d. l'Artill. francaise», 1927 (T. VI), fasc. 1.
125. A. Comtet — Caractéristiques mécaniques de l'acier soumis à des efforts brusques, en particulier à l'action des gaz de poudre. «M. d. l'Artill. franc.», 1928 (t. VII), 2 fasc.
126. Coupaye — Influence de l'inclinaison des rayures sur la tenue des projectiles. «Mem. d. l'Artill. nav.», t. II, 1908.
127. C. Cranz — Lehrbuch der Ballistik.
128. C. Cranz — Innere Ballistik. Berlin, 1926.
129. Cranz und Rothe — Temperatur und Wärmemessungen am Infanteriegewehr. «M. 98 Leits. f. d. ges. S. u. S.», 1908.
130. W. Crozier — Rapport du Directeur du Bureau de l'Artillerie. Washington, 1913.
131. F. Cwick — Über die Frage der Lebensdauer grosskalibriger Rohre. «Mitteil. u, Gegenst. d. Art. u. Gen. Wesens»., 1908.
132. A. Dagory — L'encuivrage des canons. Mèm. de l'Art. fr.T. VI, I fasc., 1927.
133. A. Dagory — Note sur l'encuivrage des canons. Mèm. de l'Art. fr. T. VIII, 3 fasc., 1929.
134. A. Dagory — L'encuivrage des canons. Le procedé d'anticuivrage et de désencuivrage automatique par l'étain. «Revue industrielle», 1921, Nov.
135. Dann — Journal of the Unit. Stat. Art. 1897.
136. E. Demenge — Le desencuivrage des bouches a feu. «Bullet. de renseignement de l'artillerie», 1919, Janv.-fev.
137. E. Demenge — L'érosions des canons. «Revue generale des Sciences». 1918.
138. Ф. Джолитти — Цементация стали. У. Эйли.
139. Ф. Джолитти — Нитрация стали. У. Эйли, 1933 г.
140. O. Dziobek —Die Beanspruchung der Kanonenrohre nach der dynamischen Theorie. «Mitteil. über Gegensd. d. Artillerie- u. Genie-Wesens», I Heft, 1900.
141. Esclangon — Акустика орудий и снарядов. «Mem. de l'art. franc.» 1928, N 3.
142. Examen de rings provenant de l'ame d'un canon de 10 pouces. «Watertown Arsenal Annuel Report of Tests of Metals», 1916.
143. H. Fay — Erosion of guns the hardening of the surface. «Journal of United States Artillery», 1917 (v. 47).
144. H. Fay — The cause of the white layer. «Army Ordnance», 1925, N 30.
145. H. Fay — Выгорание орудий. «Труды Амер. Инст. горных инженер.», 1916 г., Rivista Marittima, 1918.
146. F. D. — L'érosion des canons d'acier par les gaz de la poudre. «Genie civil», Paris, 1916, Juil.
147. L. Gabeaud — Essai sur la théorie des résistances passives. «M. de l'Art. fr.», 1930, N 2.
148. L. Gabeaud — Essai sur les arasements de ceinture, causes remèdes. «Mem. d. l'Artill. franc.», 1923, fasc. I.
149. L. Gabeaud — Au sujet de mémoire initulé. «Considerations théoriques sur la durée des tubes de Justrow», «Revue d'artillerie», 1924, Aout.
150. L. Gabeaud — Note sur les causes de production de certains phénomenes de coups anormaux. «Rev. d'Artill.», 1921, Déc.

151. L. Gabeaud — Note sur le désencuivrage des bouches a feu par l'emploi d'alliage étain — plomb soudé au culot. 1923. «Mem. d. l'artil. ftanc», T. II, 2 fasc.
152. L. Gabeaud — Essai d'une théorie d'usure des bouches à feu. «Mèm de l'art. franc», 1933, N 2.
153. L. Gabeaud — Sur la théorie des freins de tir. «Mem. de l'art. franc.», 1932, N 1.
154. Gossot et Liouville — Ballistique intérieure, 1922.
155. Mario Graziani— Alterarione dell'acciaio nei tubi d'anima della boche da fuoco logorate dal tiro. «Rivista di Artiglieria e Genio», 1928, Marzo.
156. R. H. Greaves, H. H. Abram, S. H. Rees — The erosion of guns, «Journ. Ir. a St. Inst.», 1929, N 1. «Engineering», 1929, May 24. «Mem. d. l'Artill.» T. IX, 2 fasc. 1930.
157. Gun Erosion, «Engineering», 1918 (Vol. CV), June 7.
158. A. C. Hadcock — Interior Ballistics. «Proceedings of the Royal Society», 1917.
159. Hartmann — Distrubution des déformations dans les metaux, soumis à des éfforts. «Revue d'Artillerie», T. 45, 46.
160. M. Hélie — Traité de Ballistique expérimentale
161. Heydenreich — Die Lehre vom Schuss, 1908.
162. Hicks — The theory of the rifle and rifleshocting, 1919.
163. Hirsch — Untersuchungen über die beim Schuss eintretenden Ver luste an Arbeit der Pulvergase, «Kriegstechnische Zeitschrift» 1903, N 7.
164. Hirsch — Vorgänge im Innern des Gewehres beim Schuss, «Kr. Z.», 1906, N 5.
165. H. M. Howe — The erosion of guns. «Bullet. American Inst. of Mining Engineers», N 134, 1918.
166. H. G. Howort — La fissuration des tubes interieurs (acier an carbone). «Research Department, Woolwich, R. D.», 1910.
167. Hugoniot et Sebert — Etude des effets de la poudre dans un canon de 10 centimetres, «Mem. d. l'Artill. de la Marine», 1882.
168. H. J. Jones — The erosion of gun tubes and heat phenomena in the bore of a gun, «Engineering», 1911, March 24.
169. H. J. Jones — The stiffuess of guns, «Journ. U. S. Artill.», v. 35, 1911, N 1.
170. H. J. Jones — Characteristics of the wear of the guns and howitzers, «The Journal of the royal artillery», 1919, July.
171. Justrow — Theoretische Betrachtungen über die Lebensdauer unserer Geschutz-Minen-Werferrohre, Gewehr- und Pistolenläufe und über deren Beziehungen zur Geschossführung. Verlag «Offene Worte» Charlottenburg 4; 1923.
172. A. Indra — Analytische Theorie der Wärmeleitung in Geschützrohren, 1893.
173. A. Indra — Experimentale Untersuchungen über die Spannungsverhältnisse der Pulvergase in Geschützrohren, «Mitteilungen über Geg. d. Art. und Geniewesens», 1901.
174. A. Indra — Zur Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus den vor der Mündung gemessenen Geschossgeschwindigkeiten, «Mit. über Geg. d.'Art. und Genie-Wesens», 1898, Jan.
175. G. Kaiser — Construction der gezogenen Geschützrohre, 1892.
176. Kalakoutsky — Expériences sur les pressions dans les canons de fusil. «Revue d'art.», 1880, V.
177. Kampé de Feriet — La mesure des vitesses des projectiles, «Mem. de l'art. franc.», 1925, N 2.
178. A. Keller — Die Lebensdauer der Geschütze. «Schweiz. Zeitschr. f. Artill. u. Genie», 1916, 12.
179. M. Klever — Die Theorie der festen Losungen und der Occlusion in ihrer Anwendung auf die Probleme des «Nachschlagens» und «Ausbrennens» in mit Nitratpulver beschossenen Waffen. «Kriegstechn. Zeitschrift für das gesamte Schiess und Sprengstoffwesen», 1907.

180. E. Kratochwill — Rapport sur les travaux de la commission d'experiences de tir pendant les années 1915—1916 (trad.). «Mem. d. l'Artill. franc.», 1922 (T. I), 3 fasc.
181. Проф. Крехор и др. Сквайр — Статья в журн. «Journal of the United States Artillery», 1895, июль.
182. Проф. Крехор и др. Сквайр — Apparatus for measuring the sped of projectiles, «Scientific American», 1896, N 18.
183. R. E. Kutterer — Messung des Geschosswiderstandes im Rohr, «Wehrtechnische Monatshefte», 1935, H. 12.
184. La vie et la puissance de l'artillerie lourde, «Engineering», 1909.
185. L'érosion des canons, «Watertown Arsenal, Annuel Report of Tests of Mteals», 1914.
186. A. Lanfroy — Sur la cause des érosions dans l'ames des bouches a feu, «Mem. d l'artill. de la marine», 1885, T. XIII.
187. Langevin — Note sur les effets balistiques de la détente des gaz dans une tuyere convergente — divergente. «Mem. de l'art. franc.», 1923, N I.
188. H. H. Lester — White Layer in Gun Tubes. «Trans. Amer. Soc. f. St. Treat», 1929 (v. XVI), Oct,, N 5.
189. M. Letang — Sur l'usure des bouches a feu. «Mem. d. l'Artill. franc.», 1922, 4 fasc.
190. M. P. Libessart — Mesure statique continuée du forcement dans les canons. «Mem. de l'Artill. franc.», 1932, N 1.
191. Lorentz — Die Energieverluste in Rohrenerweiterungen und Krümmern. «Zeits. f. techn. Physik», 1929, Jan.
192. A. E. H. Love and F. B. Pidduck — Lagrange's Ballistic Problem. «Philosph. Transactions of the Royal Soc. of London», Ser. A. vol. 222. «Mem. de l'art. franc.», 1924, fasc. N 2.
193. G. Mainardi — Costruzioni d'Artiglieria, II Balistica Interna, Parte prima, Balistica Interna tearica. Torino 1932, X.
194. Худсон Максим — Дискуссия по докладу Фея, Рив. Мар. 1918 г.
195. A. Mallock — Rapport fait a la Commission de l'Artillerie, «Woolwich, 1905».
196. P. Martin — Déformation et résistance des bouches a feu sous des efforts dynamiques. «Mem. d. l'Art. franc.», 1924, f. 2, 1925, f. 4.
197. Mercier — Perturbations dans le tir des bouches a feu de gros calibre. «Rev. d'artill.», T. 93, 1924, 1, 3.
198. Minarelli Fitz Gerald — Neue Methode zur Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit von Gewehrprojectilen in der Nahe der Mundung, «Mit üb. Geg. d. Art. u. Gen.-Wes.», 1901.
199. Muraour — Notes de balistique intérieure, «Mem. de l'art. franc.», 1925. N 2.
200. D. C. Mc Nair — Erosion des ames rayées, «Army ordnause», 1928.
201. Capt. Sir A. Noble — Methods that have been adopted for measuring pressures in the bores of guns, 1894.
202. Sir Andrew Noble — Artillerie et explosifs. «J. Murroy, London, 1906».
203. Cap. Noble — Note on the energy absorbed by friction in the bores of rifled guns. «Proceedings of the R. Society», 1891, vol. 50.
204. Capt. Noble and F. Abel — Researches on explosives Fired Gunpowder, 1875.
205. Nowakowski — Beitrag zur inneren Ballistik der Röhren,- Ring- und Bandpulver. «Mitteilungen über Gegenstände des Art. u. Geniewesens», 1917, N 8.
206. M. Okochi — Concerning the increase of the velocity of a projectile after leaving the muzzle. «Journal of the Un. St. Art.», 1914, Mar.
207. M. Okochi — On Erosion of Guns. «Journal of the College of Engineering Tokyo Imperial University», 1919 (vol. IX), N 7.
208. F. Osmond — Note sur la tempe superficielle de l'acier soumis a l'action des explosifs. «Mem. des poudre et salpêtres», 1901.

209. P. Paquelier — Usure, l'encuivrage, l'acierage et le baguage des canons. «M. d. l'artill. franc.», T. I, 4 fasc., 1922.
210. P. Paquelier — Usure et désencuivrage des canons. «Mem. d. l'Artill. franc.», T. VIII, 3 fasc, 1929.
211. P. Paquelier — De l'influence de la chaleur sur la résistance des bouches a feu. «Mem. de l'Artill. franc.», 1924, T. III, 3 fasc.
212. Pasdach — Die Beseitigung der Nachschläge in den mit Nitratpulver beschossenen Gewehren durch das Ballistol—öl klever. «Kriegstechn. Zeit.», 1906, N 9.
213. W. Payman, D. W. Woodhead — Exposion waves and chock waves. The wave speed camera and its application to the photography of bullets in flight. «Proceed. of the Royal Society», Seris A. vol. 132 av. «Mem. de l'art. franc.», 1933, N. 3.
214. H. Peloux — La théorie Tschernov sur l'érosion. «Revue d'Artillerie», 1913.
215. E. Piantanida — Sulle alterazioni subite d'all'acciaio dei tubi animma dei cannoni usurati. «Rivista Marittima», 1922, Oct. «Mem. d. l'art. franc.», 1923, 4 fasc.
216. M. Pilgram — Uber den Einflüss rasch wechselnder Gasdrücke auf Formeänderung und Beanspruchung eines Geschützrohrs. «Artill. Monatsh.», 1914, 1916, N 109.
217. Piobert — Traité d'artillerie Partie théorique. «Mouvement des gas de la poudre», 1868.
218. Portevin et Garvin — Etude sur la ceinturage des obus. «Mem. d. l'Artill. franc.», 1926 (T. V), 2 fasc.
219. Portevin et Garvin — Railway Artillery. Vol. I: I.—A report on the characteristics scope of utility, etc. App. II—«Study of the relative efficiency of different calibres». «Ordnance Department Document», N 2034. Washington, 1921.
220. Quayle — La photographie par éttincelles et son application a quelques problemes de balistique. «Mem. de l'art. franc.», 1928, N 3.
221. Radakovic — Uber den Verlauf der Geschwindigkeit eines Projectils in der Nähe der Gewehrmündung. «Sitzungsberichte der K.-K. Ak. der Wien.», 1900. Apr. und Jul.
222. Radakovic — Uber eine neue Methode zur Bestimmung von Geschossgeschwindigkeiten. «Там же», т. CIX, Abt. II A.
223. Radakovic — Bemerkungen zu der experimentellen Bestimmung des Verlaufens der Geschossgeschwindigkeit. «Mit. üb. Geg. d. Art. u. Gen. Wesen» s. 1906.
224. Rato — Théorie des freins de bouche. «Mem. de l'art. franc.», 1932, N 1.
225. Ravelli — Studio per la teoria del freno di bocca, «Rivista di Artiglieria e Genio», N XI—XII, 1928 u N 1, 1929.
226. V. Recchi — Die modernen Kriegspulver und deren Einwirkung auf Gewehrlaufe und Geschützrohre, «Zeit. f. d. gesam. Schiess- und Spreng-Wes.», 1906.
227. D-r Альдо Редже — О выгорании орудий. «Rivista Marittima», 1935—IV.
228. Д-р Ричардс — Дискуссия по докладу Фея. «Rivista Marittima», 1918.
229. P. de Saint Robert — Mémoires scientifiques, t. II, 1873.
230. Sir W. C. Roberts-Austen — The action of the projectile and the explosives on the tube of steel guns. «Journal of the Iron and Steel Institute», 1898, N 11.
231. H. Rohne — Nochmals uber die Lebensdauer schwerer Geschütze. «Artill. Monatsch.», 1910, N 38.
232. H. Rohne — Über Ausbrennungen der Geschützrohre. «Artill. Monatsh.», 1907, N 8.
233. H. Rohne — Über die Lebensdauer schwerer Geschütze. «Artill. Monatsh.», 1909, N 29.
234. H. Rohne — Rohrausbrennungsversuche in den Vereinigten Staaten. «Artill. Monatsh.», 1911, N 52, 56.

235. Рюденберг — О скорости распространения и силе скачков уплотнения, (перевод из «Artilleristische Monatshefte», 1916, N 113).
236. Guido Sansoni — Initial velocity as affected by erosion. «Journal of U. S. Art.», 1910.
237. Sarrau — Formule de la pression maximum dans les armes, 1882.
238. Sarrau — Nouvelles recherches sur les effets de la poudre dans es armes, 1876.
239. Schmalz — L'érosion des canons allemands. Théorie Tchernoff sur l'érosion. «Bullet. de renseign. de l'artillerie», Paris, 1918, Mars.
240. A. Schmidt — Die Theorie des Verdichtungsstosses in Gasen und der Detonation Nelle. «Zeitschr. f. d. gesam. S. u. S. W.», 1932. «Mem. de l'art. franc.», 1933, N 3.
241. A. Schweegen — Lebensdauer grosskalibriger Geschützrohre. «Mitteil. u. Gegenst. d. Art. u. Gen.-Wesens», 1909.
242. Schweikert — Innere Ballistik, 1923.
243. Enrico Bianco di- S. Secondo — Usura delle bocche da fuoco. «Rivista Marittime», 1927. Nov. e. dec. «Mem. de l'artill. franc.», 1929, (T. VIII), 3 fasc.
244. P. Siwy — Die Abnützung der Geschütze und deren Ursachen. «Zeit. für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen», 1908, N 3—4; 1910.
245. P. Siwy — Uber die Ursachen der schnellen Abnützung grosser Geschütze. «Dinglers polytechnisches Journal», 1907, H. 13.
246. J. Soutra — Note sur la résistance transversale pratique des canons frettés. «Mem. d. l'Artill. franc.», 1928 (T. VII), 2 fasc.
247. W. W. Sveshnikoff — Carburization as a factor in the erosion of machine gun barrels. «Army Ordnance», 1925, N 30.
248. W. W. Sveshnikoff — Notes on lacalized enlargements of machine gun barrels. «Army Ordnance», 1923, N 21.
249. W. W. Sveshnikoff — Some factors affecting the life of machine gun barrels. U. S. Bureau of Standarts 1921. Techn. Pap. N 191 Washington.
250. W. W. Sveshnikoff — Über die Abnützung der Geschützrohre und die Lebensdauer der Geschütze. «Schweizerische Zeit. f. Artill. u. Genie», 1916, N 4.
251. W. W. Sveshnikoff and H. E. Haring — Electroplating Worn Machine Gun Barrels. «Army Ordnance», 1924, N 26.
252. G. Tchekoff — Considération sur l'usure des canons des armes portatives, T. X, 3 fasc., 1931.
253. G. Tchekoff — Influence de l'usure des canons d'armes a feu portatives sur leur rendement, T. XI, 2 fasc., 1932.
254. G. Tchekoff — Note sur l'usure des évents des canons d'armes automatiques a emprunt de gaz, T. XII, I fasc., 1933.
255. M. Terazawa, M. Tamano, S. Hattori — Les ondes de bouche. «Бюллетень Инст. аэронавигацион. исслед. в Токио», 1935. Т. 9, вып. 19. «Mem. d. l'art. franc.», 1936, N 2.
256. I. Tobell — Über den Wärmeübergang beim Schnellfeuer und den Einfluss der kunstlichen Kühlung. «Mit. über Gegen. d. Art.- und Genie-Wesens. 1888.
257. I. Tobell — Über die Ursachen der Lauferwärmung beim Feuer. «Mitt. über Gegen. d. Art.- u. Genie-Wesens», 1890.
258. T. G. Tulloch — L'usure dans les canons de gros calibre. «Royal Artillery Institution Woolwick», 1921.
259. Vallier — Balistique des nouvelles poudres.
260. L. Vasseur — Etude sur les dégradations a l'intérieur des bouches a feu. «Revue d'Artillerie», 1907, XI.
261. P. Vieille — Etude sur les phénomény d'érosion produits par les explosifs. «Mem. d. poudres et salpetres», 1901.
262. P. Vieille — Etude des pressions ondulatoires produites en vase clos «Mem. des poudres et salpetres.», 1890, III.
263. Voituriez — Etudes de balistique intérieure. «Mem. de l'Art. franc.», 1933, N 1.

264. H. E. Wheeler — Nitrogen in steel and the erosion of guns. «Trans. Amer. Inst. Min. Metal. Eng.», 1922.
265. H. E. Wheeler — The Nitrogen theory of erosion. «Army Ordnance», 1925, N 30.
266. Wolff — Über die Geschwindigkeit in der Nähe vor der Gewehrmündung. «Kriegst. Zeitschr.», 1905, N 9.
267. Über die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses bei Handfeuerwaffen. «Mit. üb. Geg. d. Art. u. gen.-Wes.», 1900, Okt.
268. A. G. Zimermann — Old and new théories in gun erosion. «Army Ordn.», 1925, N 30.
269. H. E. Jarnell — Gun erosion «Journ. Amer. Soc. Naval Eng» 1910, № 2, «Journ U. S. Art». 1910.
270. Уилер — Азот в стали и выгорание орудий. «Труды Амер. Инст. Горн. инженер. и металлург», 1920.
271. Л. Уолдо — Дискуссия по докладу Фея. «Ривиста Марит. 1918 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение *Стр.*

От автора 3
§ 1. Выстрел и сопровождающие его явления 5
§ 2. Работа, производимая пороховыми газами 9

Глава I. Снаряд

§ 3. Поступательное движение снаряда 11
Задачи 1—5. Вычисление работы A_1 11
§ 4. Влияние нарезов 12
§ 5. Форсирование 14
§ 6. Вращательное движение снаряда в канале ствола 20
Задачи 6—9. Вычисление работы A_2 21
§ 7. Силы, действующие между поверхностями выступов ведущего пояска и нарезов 24
§ 8. Определение „реакции пояска“ Φ 27
§ 9. Определение нормальной реакции боевой грани нареза N 29
Задача 11. Определение средней величины нормальной реакции боевой грани N 37
§ 10. Анализ формул для нормальной реакции боевой грани нареза N . . . 37
§ 11. Сопротивление нарезов при движении снаряда по каналу ствола . . 40
§ 12. Работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления, оказываемого нарезами 42
Задачи 12—19. Вычисление работы A_3 46
§ 13. Работа трения при нарезках постоянной и прогрессивной крутизны . . 50
Задача 20. Вычисление работы, затрачиваемой на трение о боевую грань при нарезках постоянной и прогрессивной крутизны 52
§ 14. Форма и профиль нарезов 54
§ 15. Работа веса снаряда и связанной с ним силы трения 58
Задачи 21—22 Вычисление работы веса снаряда и связанной с ним силы трения 59
§ 16. Сопротивление воздуха, находящегося в канале ствола 60

Глава II. Заряд

§ 17. О характере расширения пороховых газов 61
§ 18. Поступательное движение продуктов горения и заряда 64
Задачи 23—28. Вычисление работы A_4 70
Задача 29. Определение работы, затрачиваемой на поступательное движение заряда, делением заряда на несколько равных частей 72

§ 19. Явления в заснарядном пространстве 73
§ 20. О распределении давлений пороховых газов между дном снаряда и дном канала 76
Задачи 30—34. Вычисление давлений на дно канала $p_{дн}$ 85
Задачи 35—37. Вычисление наибольшего усилия, передаваемого откатным частям 87
§ 21. Неучитываемые явления, относящиеся к сгоранию заряда в канале ствола 88
Задача 38. Вычисление работы трения пороховых газов 90

Глава III. Ствол

§ 22. Абсолютное и относительное движение снаряда 92
§ 23. Откат ствола 93
Задачи 39—42. Вычисление работы A_5 97
Задачи 43—47. Вычисление скорости свободного отката $V_{од}$, отвечающей моменту вылета снаряда 98
Задачи 48—52. Вычисление длины свободного отката l_{Q_0}, отвечающей моменту вылета снаряда 100
Задачи 53—54. Вычисление работы A_5 при абсолютной и относительной скоростях. 102
Задача 55. Вычисление импульса отдачи ствола 104
§ 24. Нагревание ствола огнестрельного оружия при выстреле 105
§ 25. Работа, затрачиваемая на упругие деформации стенок ствола 114
Задача 56. Вычисление работы, затрачиваемой на упругие деформации стенок ствола 115
§ 26. Износ канала ствола огнестрельного оружия 116
§ 27. Характерные виды износа канала ствола 118
§ 28. Теории износа канала ствола огнестрельного оружия 126
§ 29. Факторы, влияющие на износ канала ствола огнестрельного оружия 146
§ 30. Меры борьбы с износом канала ствола 153

Глава IV. Учет работ, производимых пороховыми газами

§ 31. Коэфициент фиктивности φ 154
§ 32. Фиктивная масса снаряда в уравнениях работы и движения 161
Задачи 57—64. Вычисление коэфициента φ 165
§ 33. Относительная величина потерь и работ, производимых пороховыми газами, и коэфициент полезного действия заряда 173

Глава V. Период последействия пороховых газов

Приложение 1. Числовые данные некоторых артиллерийских систем (для решения задач) 185
Приложение 2. Сравнительная таблица вычисленных работ 186
Библиография 187

Редактор *Шкворников П. Н.*

Техн. редактор *А. А. Базанова*

Подписала к печати *А. Н. Совари*

Сдано в набор 11/III 1939 г. Подписано к печ. 23/II 1940 г. Автор. дог. № 807. Инд. 5-2(4). Тираж 5000. Кол. печ. лист. 12½. Учетно-авт. лист. 11,89. Формат бум. 60×92/16. Уполн. Главл. А.25719. Заказ № 433.

Типография Оборонгиза.
Киев, Крещатик, 42.